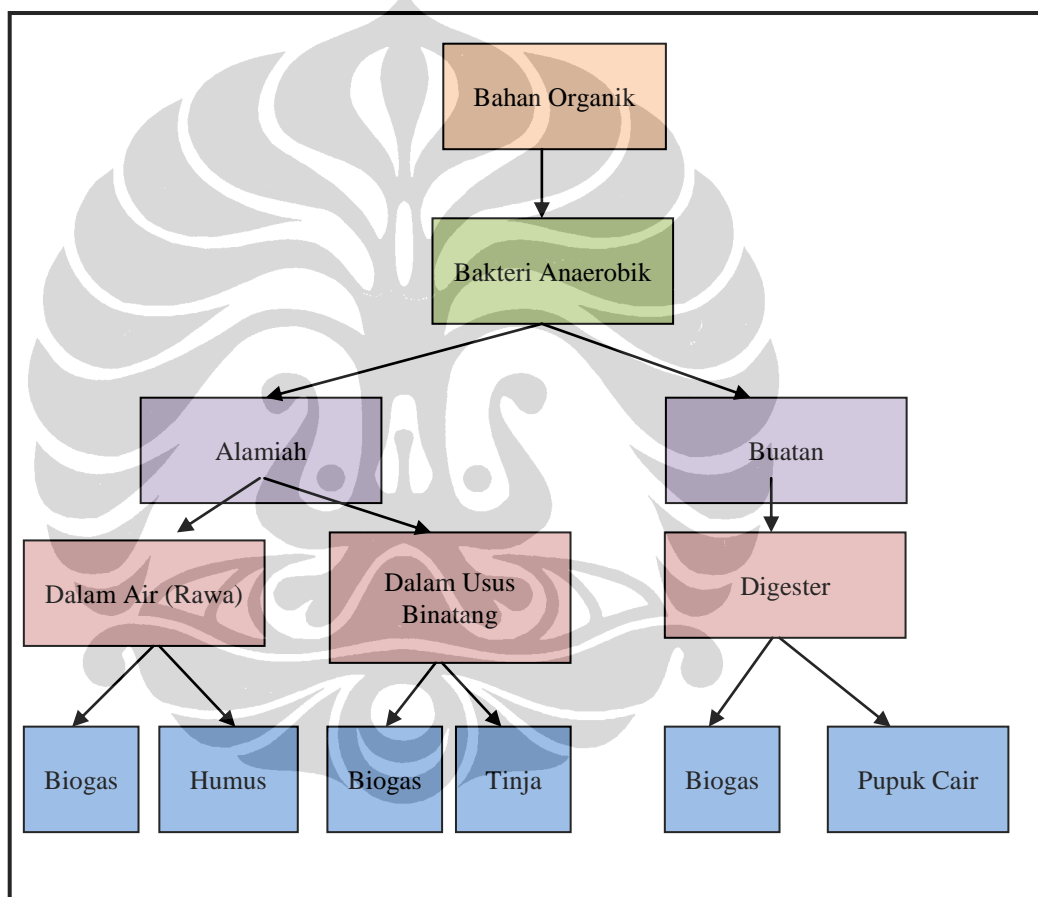


BAB II LANDASAN TEORI

2.1 DIGESTIFIKASI ANAEROBIK

Digestifikasi anaerobik adalah proses pembusukan bahan organik oleh bakteri anaerobik pada kondisi tanpa udara, yang menghasilkan biogas dan pupuk cair. Ada dua jenis digestifikasi anaerobik, yaitu alamiah dan buatan, seperti terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Proses digestifikasi anaerobik

Biogas adalah campuran gas mudah terbakar yang dihasilkan oleh bakteri metanogenik yang terjadi pada material-material yang dapat terurai secara alami dalam kondisi anaerobik. Pada umumnya biogas terdiri atas gas metana (CH_4), gas karbon dioksida (CO_2), Hidrogen (H_2) dan gas-gas lainnya dalam jumlah

yang sedikit dengan komposisi, seperti terlihat pada Tabel 2.1, dan digunakan untuk memasak, lampu biogas, dan bahan bakar mesin.

Komponen	%
Metana (CH ₄)	55-75
Karbon Dioksida (CO ₂)	24-45
Nitrogen (N ₂)	0-0.3
Hidrogen (H ₂)	1-5
Hidrogen sulfida (H ₂ S)	0-3
Oksigen (O ₂)	0.1-0.5

Tabel 2.1. Komposisi Biogas

Biogas kira-kira memiliki berat 20 persen lebih ringan dibandingkan udara dan memiliki suhu pembakaran antara 650 sampai 750⁰C. Biogas tidak berbau dan berwarna yang apabila dibakar akan menghasilkan nyala api biru cerah seperti gas LPG. Nilai kalor gas metana adalah 20 MJ/m³ dengan efisiensi pembakaran 60 persen pada konvensional kompor biogas.

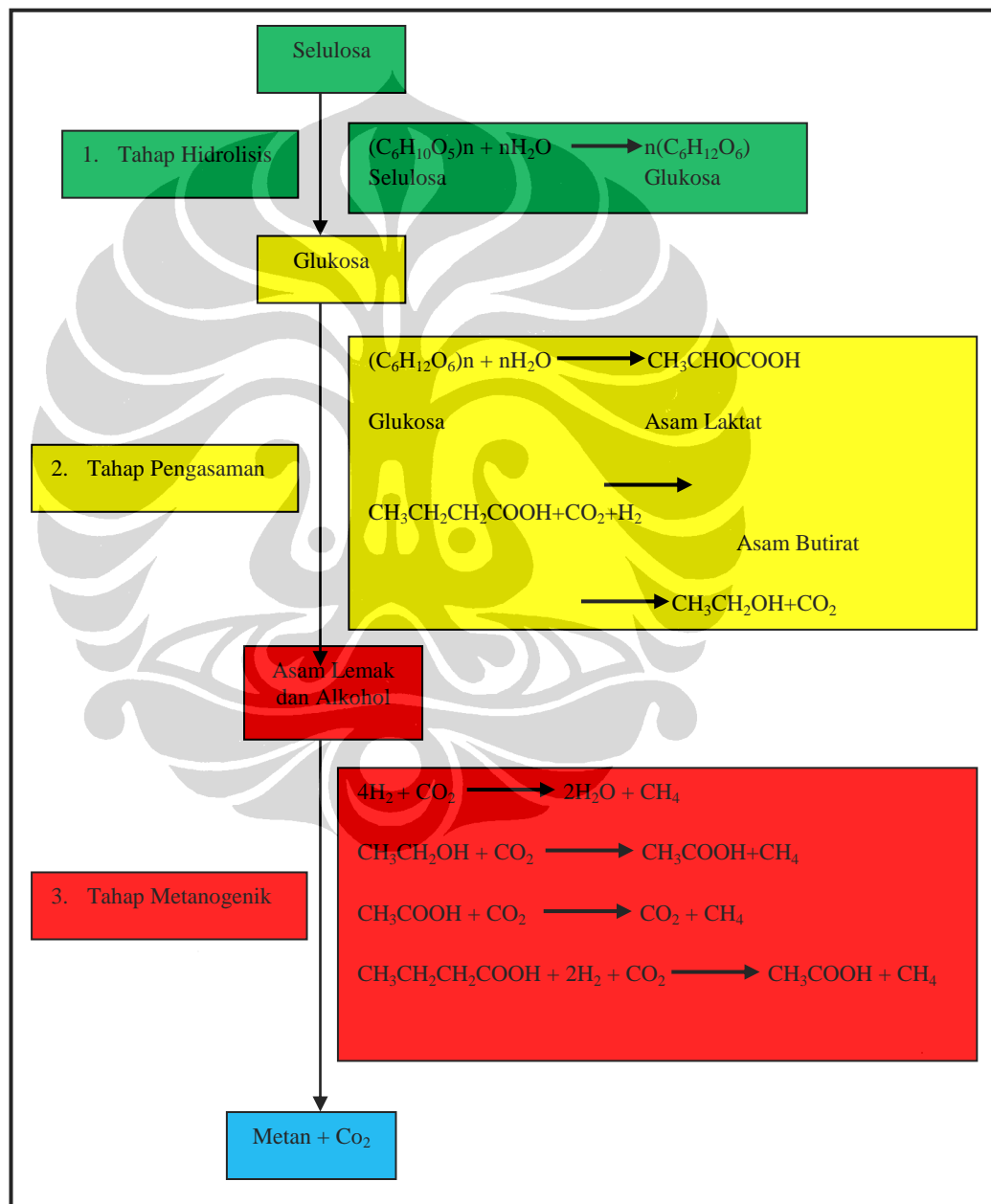
Selain dimanfaatkan untuk bahan bakar memasak, biogas sangat potensial sebagai sumber energi terbarukan karena nilai kalor pada gas metananya tersebut. Sehingga biogas dapat dimanfaatkan untuk penerangan, proses pengeringan, untuk proses penghasil panas, untuk kendaraan bermotor dan pembangkit tenaga listrik.

Pemanfaatan biogas mempunyai beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan BBM (bahan bakar minyak) yang berasal dari fosil diantaranya biogas mempunyai sifat yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui. Bahan bakar fosil yang pembakarannya kurang sempurna menghasilkan CO₂ yang merupakan salah satu gas penyebab pemanasan global. Sampah organik yang dibiarkan menumpuk dalam alam terbuka dapat menghasilkan gas metana (NH₄) sebagai akibat proses pembusukan sampah yang bereaksi dengan oksigen (O₂), gas metana mempunyai sifat polutan 21 kali dari sifat polutan CO₂, sehingga dengan dimanfaatkannya sampah sebagai bahan baku biogas dapat menekan jumlah gas

metana yang langsung dilepaskan ke udara karena gas metana sebagai salah satu komponen utama biogas digunakan dalam proses pembangkitan tenaga listrik.

2.2 Tahap Pembentukan Biogas

Sampah organik sayur-sayuran dan buah-buahan adalah substrat yang dapat digunakan untuk menghasilkan biogas. Proses pembentukan biogas melalui pencernaan anaerobik merupakan proses bertahap, dengan tiga tahap utama, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Tahap Pembentukan Biogas

Sesuai dengan Gambar 2.2 diatas proses pembentukan biogas adalah sebagai berikut:

1. Tahap Hidrolisis

Pada tahap ini pelarutan bahan organik mudah larut didalam air, dan yang susah larut dicerna menjadi bahan organik sederhana, yaitu perubahan struktur bentuk primer menjadi bentuk monomer.

2. Tahap Pengasaman

Pada tahap ini komponen monomer (gula sederhana), yang terbentuk pada tahap hidrolisis, dimakan bakteri pembentuk asam, yang menghasilkan asam asetat, propionat, format, laktat, alkohol, butirat, karbondioksida, hidrogen dan amoniak.

3. Tahap Metanogenik

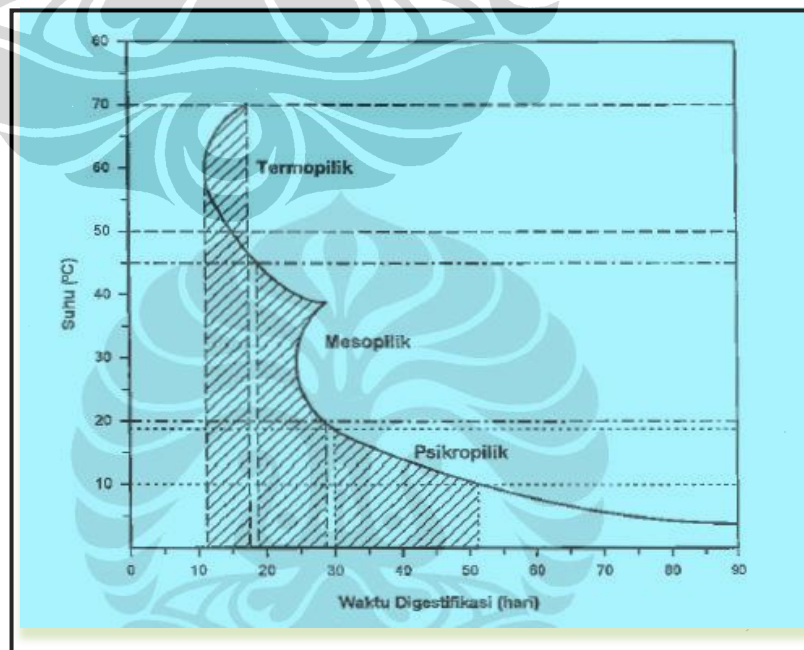
Pada tahap ini asam lemak dan alkohol dirubah menjadi metan dan karbon dioksida.

2.3 Waktu digestifikasi

Waktu Digestifikasi anaerobik didalam digester dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu:

1. Suhu

Hubungan waktu digestifikasi dan suhu dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3. Waktu Digestifikasi dan Suhu

Ada tiga kondisi digestifikasi anaerobik berdasarkan suhu digesternya, antara lain:

- **Kondisi Psikopilik**
Pada kondisi ini suhu digester antara 10-18⁰ C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 30-52 hari.
- **Kondisi Mesopilik**
Pada kondisi ini suhu digester antara 20-45⁰ C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 18-28 hari. Dibandingkan digester kondisi termopilik, digester kondisi mesopilik pengoperasiannya lebih mudah, tapi biogas yang dihasilkan lebih sedikit dan volume digester lebih besar.
- **Kondisi Termopilik**
Pada kondisi ini suhu digester antara 50-70⁰ C, dan sampah cair terdigestifikasi selama 11-17 hari. Digester pada kondisi termopilik menghasilkan banyak biogas, tapi biaya investasinya tinggi dan pengoperasiannya rumit.

2. Rasio C/N

Untuk menentukan bahan organik digester adalah dengan melihat rasio/perbandingan antara Karbon (C) dan Nitrogen (N). Beberapa percobaan menunjukkan bahwa metabolisme bakteri anaerobik akan baik pada rasio C/N antara 20-30. Jika rasio C/N tinggi, Nitrogen akan cepat dikonsumsi bakteri anaerobik guna memenuhi kebutuhan proteinnya, sehingga bakteri tidak akan bereaksi kembali saat kandungan Karbon tersisa. Jika rasio C/N rendah, Nitrogen akan terlepas dan berkumpul membentuk amoniak sehingga akan meningkatkan nilai PH bahan. Nilai PH yang lebih tinggi dari 8,5 akan dapat meracuni bakteri anaerobik. Untuk menjaga rasio C/N, bahan organik rasio tinggi dapat dicampur bahan organik rasio C/N rendah. Rasio C/N beberapa bahan organik dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Bahan organik yang bernilai C/N tinggi dapat dicampur dengan yang lebih rendah sehingga diperoleh nilai rasio C/N yang ideal, seperti pencampuran sampah organik sayur-mayur, umbi-umbian dan buah-buahan dengan limbah

toilet (kotoran manusia) pada lokasi Pasar Induk Kramat Jati untuk mencapai kadar C/N yang ideal dan produksi biogas dapat berjalan optimum.

Tabel 2.2. Rasio C/N beberapa bahan organik

Bahan Organik	Rasio C/N
Kotoran ayam	10
Kotoran kambing	12
Kotoran babi	18
Kotoran sapi	24
Sampah buah-buahan dan sayuran (organik)	25

2.4 *Total Solid (TS) dan Volatile Solid (VS)*

Pengertian *total solid content* (TS) adalah jumlah materi padatan yang terdapat dalam limbah pada bahan organik selama proses digester terjadi dan ini mengindikasikan laju penghancuran/pembusukan material padatan limbah organik.

Total Solid merupakan salah satu faktor yang dapat menunjukkan telah terjadinya proses pendegradasian karena padatan ini akan dirombak pada saat terjadinya pendekomposisi bahan. Jumlah TS biasanya direpresentasikan dalam % bahan baku.

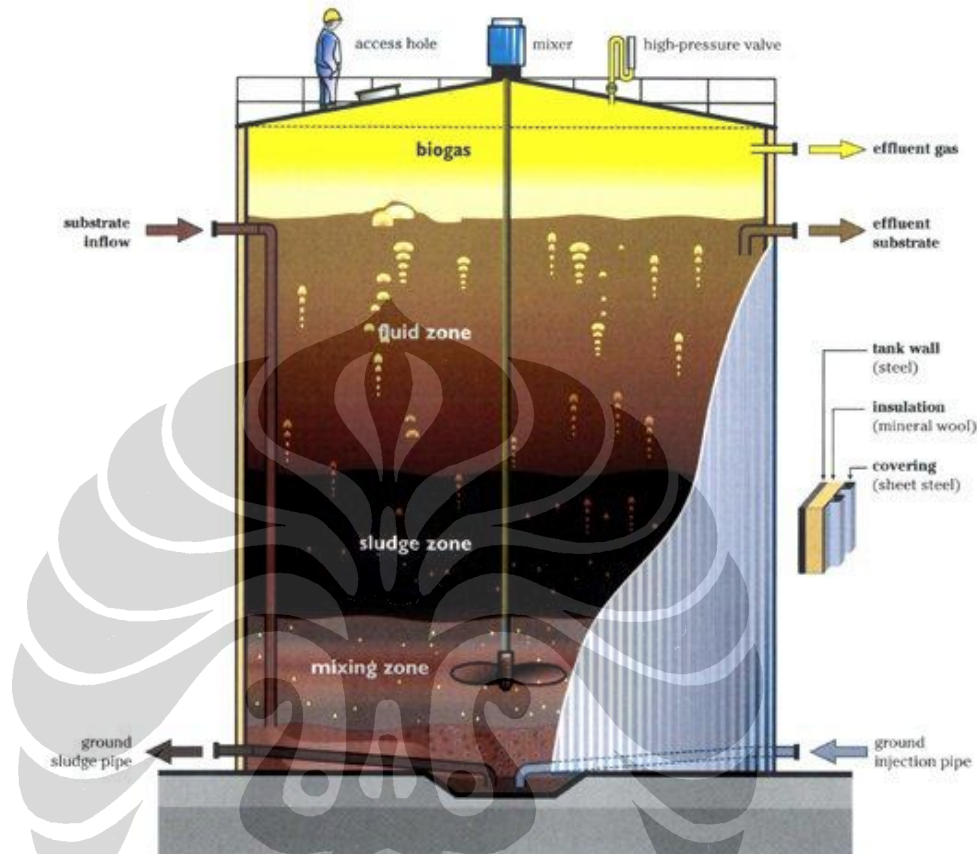
Pengertian *volatile solid* (VS) Merupakan bagian padatan (*total solid-TS*) yang berubah menjadi fase gas pada tahapan asidifikasi dan metanogenesis sebagaimana dalam proses fermentasi limbah organik.

Volatile Solid merupakan jumlah indikasi awal pembentukan gas metane, jumlah VS biasanya direpresentasikan dalam % *total solid* (TS).

2.5 **Digester Biogas**

Digester merupakan komponen utama dalam produksi biogas. Digester merupakan tempat dimana bahan organik diurai oleh bakteri secara anaerob (tanpa udara) menjadi gas CH₄ dan CO₂. Digester harus dirancang sedemikian rupa sehingga proses fermentasi anaerob dapat berjalan dengan baik. Pada umumnya

produksi biogas terbentuk pada 4-5 hari setelah digester diisi. Produksi biogas menjadi banyak pada 20-35 hari.



Gambar 2.4 Digester Biogas

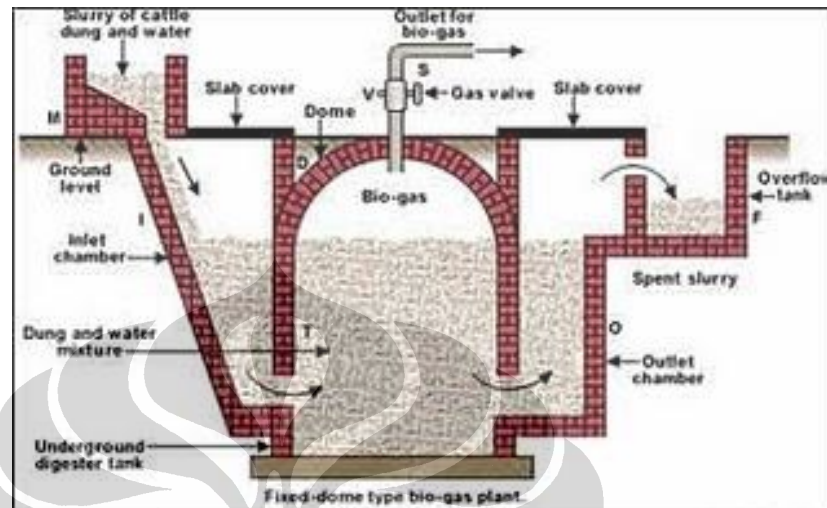
2.5.1 Jenis-jenis Digester Biogas

Terdapat beberapa jenis digester yang dapat dilihat berdasarkan konstruksi, jenis aliran, dan posisinya terhadap permukaan tana. Jenis digester yang dipilih dapat didasarkan pada tujuan pembuatan digester tersebut. Hal yang penting adalah apapun yang dipilih jenisnya, tujuan utama adalah mengurangi kotoran dan menghasilkan biogas yang mempunyai kandungan CH_4 tinggi. Dari segi konstruksi, digester dibedakan menjadi:

a. *Fixed Dome* (kubah tetap)

Digester jenis ini mempunyai volume tetap. Seiring dengan dihasilkannya biogas, terjadi peningkatan tekanan dalam digester. Karena itu, dalam konstruksinya digester jenis kubah tetap, gas yang terbentuk akan segera

dialirkan ke pengumpul gas di luar reaktor. Indikator produksi gas dapat dilakukan dengan memasang indikator tekanan. Skema digester jenis kubah dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Digester Tipe Fixed Dome

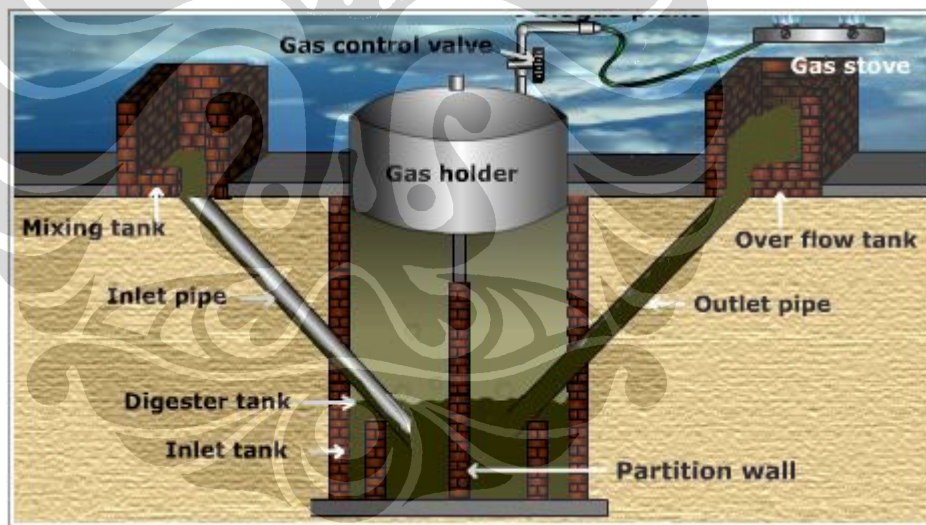
Digester jenis kubah tetap mempunyai kelebihan dan kekurangan seperti pada Tabel 2.3 sebagai berikut:

Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan Digester Jenis Kubah Tetap

Kelebihan	Kekurangan
<ol style="list-style-type: none"> 1. Konstruksi sederhana dan dapat dikerjakan dengan mudah. 2. Biaya konstruksi rendah. 3. Tidak terdapat bagian yang bergerak. 4. Dapat dipilih dari material yang tahan karat. 5. Umurnya panjang. 6. Dapat dibuat didalam tanah sehingga menghemat tempat. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bagian dalam digester tidak terlihat (khususnya yang dibuat di dalam tanah) sehingga kebocoran tidak terdeteksi. 2. Tekanan gas berfluktuasi dan bahkan fluktuasinya sangat tinggi. 3. Temperatur digester rendah.

b. *Floating Dome* (Kubah Apung)

Pada digester tipe ini terdapat bagian yang reaktor yang dapat bergerak seiring dengan kenaikan tekanan reaktor. Pergerakan bagian kubah dapat dijadikan indikasi bahwa produksi biogas sudah mulai atau sudah terjadi. Bagian yang bergerak juga berfungsi sebagai pengumpul biogas. Dengan model ini, kelemahan tekanan gas yang berfluktuasi pada reaktor biodigester jenis kubah tetap dapat diatasi sehingga tekanan gas menjadi konstan. Kelemahannya adalah membutuhkan teknik khusus untuk membuat tumpangan gas bergerak seiring naik atau turunnya produksi biogas. Kelemahan lainnya adalah material dari tumpangan gas yang dapat bergerak harus dipilih yang mempunyai sifat tahan korosi, hal tersebut menyebabkan harganya relatif lebih mahal.



Gambar 2.6 Digester Tipe *Floating Dome*

Berdasarkan aliran bahan baku untuk reaktor biogas, digester dibedakan menjadi:

a. Bak (Batch)

Pada digester tipe bak, bahan baku ditempatkan di dalam suatu wadah atau bak dari sejak awal hingga selesainya proses digestion. Digester jenis ini

umumnya digunakan pada tahap eksperimen untuk mengetahui potensi gas dari limbah organik atau digunakan pada kapasitas biogas yang kecil.

b. Mengalir (continuous).

Untuk digester jenis mengalir, aliran bahan baku dimasukkan dan residu dikeluarkan pada selang waktu tertentu. Lamanya bahan baku berada dalam reaktor digester disebut waktu retensi (retention time/RT).

Berdasarkan segi tata letak penempatan, digester dibedakan menjadi:

a. Seluruh digester diatas permukaan tanah

Biasanya digester jenis ini dibuat dari tong-tong bekas minyak tanah atau aspal. Kelemahan tipe ini adalah volume yang kecil, sehingga biogas yang dihasilkan hanya mampu digunakan untuk kebutuhan sebuah rumah tangga. Kelemahan lain adalah kemampuan material yang rendah untuk menahan korosi sehingga tidak tahan lama. Untuk skala yang besar, digester jenis ini juga memerlukan luas lahan yang besar juga.

b. Sebagian tangki biogas diletakkan dibawah permukaan tanah.

Digester ini terbuat dari campuran semen, pasir, kerikil dan kapur yang dibentuk seperti sumur dan ditutup dari plat baja atau konstruksi semen. Volume tangki dapat dibuat untuk skala besar ataupun skala kecil sehingga dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Kelemahan pada sistem ini jika ditempatkan pada daerah yang memiliki suhu dingin (rendah) suhu dingin yang diterima oleh plat baja merambat ke bahan baku biogas, sehingga memperlambat proses bekerjanya bakteri, seperti diketahui bakteri akan bekerja optimum pada rentang temperatur tertentu saja.

c. Seluruh tangki digester diletakkan dibawah permukaan tanah.

Model ini merupakan model yang paling populer di Indonesia, dimana seluruh instalasi digester dibuat di dalam tanah dengan konstruksi permanen. Selain dapat menghemat tempat lahan, pembuatan digester di dalam tanah juga berguna mempertahankan suhu digester stabil dan mendukung pertumbuhan bakteri methanogen. Kekurangannya jika terjadi kebocoran gas dapat menyulitkan untuk memperbaikinya.

2.5.2 Komponen Utama Digester

Komponen-komponen digester cukup banyak dan bervariasi. Komponen yang digunakan untuk membuat digester tergantung dari jenis digester yang digunakan dan tujuan pembangunan digester. Secara umum komponen digester terdiri dari empat komponen utama sebagai berikut:

1. Saluran masuk *slurry* (bahan organik).

Saluran ini digunakan untuk memasukkan *slurry* (campuran sampah organik dan air) ke dalam reaktor utama biogas. Tujuan pencampuran adalah untuk memaksimalkan produksi biogas, memudahkan mengalirnya bahan baku dan menghindari endapan pada saluran masuk.

2. Ruang *digestion* (ruang fermentasi)

Ruang *digestion* berfungsi sebagai tempat terjadinya fermentasi anaerobik dan dibuat kedap udara. Ruang ini dapat juga dilengkapi dengan penampung biogas.

3. Saluran keluar residu (*sludge*)

Fungsi saluran ini adalah untuk mengeluarkan kotoran (*sludge*) yang telah mengalami fermentasi anaerobik oleh bakteri. Saluran ini bekerja berdasarkan prinsip kesetimbangan hidrostatik. Residu yang keluar pertama kali merupakan *slurry* masukan yang pertama setelah waktu retensi. *Slurry* yang keluar sangat baik untuk pupuk karena mengandung kadar nutrisi yang tinggi.

4. Tangki penyimpan biogas

Tujuan dari tangki penyimpan biogas adalah untuk menyimpan biogas yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik. Jenis tangki penyimpan biogas ada dua, yaitu tangki bersatu dengan unit reaktor (*fixed dome*) dan terpisah dengan reaktor (*floatable dome*). Untuk tangki terpisah, konstruksi dibuat khusus sehingga tidak bocor dan tekanan yang dihasilkan dalam tangki seragam.

2.5.3 Komponen Pendukung Digester

Selain empat komponen utama tersebut di atas, pada sebuah digester perlu ditambahkan beberapa komponen pendukung untuk menghasilkan biogas dalam jumlah banyak dan aman. Beberapa komponen pendukung adalah:

1. Katup pengaman tekanan (*control valve*)

Fungsi dari katup pengaman adalah sebagai pengaman digester dari lonjakan tekanan biogas yang berlebihan. Bila tekanan dalam tabung penampung biogas lebih tinggi dari tekanan yang diijinkan, maka biogas akan dibuang keluar. Selanjutnya tekanan dalam digester akan turun kembali. Katup pengaman tekanan cukup penting dalam reaktor biogas yang besar dan sistem kontinu, karena umumnya digester dibuat dari material yang tidak tahan tekanan yang tinggi supaya biaya konstruksi digester tidak mahal. Semakin tinggi tekanan di dalam digester, semakin rendah produksi biogas di dalam digester terutama pada proses *hidrolisis* dan *acydifikasi*. Selalu pertahankan tekanan diantara 1,15-1,2 bar di dalam digester.

2. Sistem pengaduk

Pada digester yang besar sistem pengaduk menjadi sangat penting. Tujuan dari pengadukan adalah untuk menjaga material padat tidak mengendap pada dasar digester. Pengadukan sangat bermanfaat bagi bahan yang berada di dalam digester anaerobik karena memberikan peluang material tetap tercampur dengan bakteri dan temperatur terjaga merata diseluruh bagian. Dengan pengadukan potensi material mengendap di dasar digester semakin kecil, konsentrasi merata dan memberikan kemungkinan seluruh material mengalami proses fermentasi anaerob secara merata. Selain itu dengan pengadukan dapat mempermudah pelepasan gas yang dihasilkan oleh bakteri menuju ke bagian penampung biogas. Pengadukan dapat dilakukan dengan:

- a. Pengadukan mekanis, yaitu dengan menggunakan poros yang dibawahnya terdapat semacam baling-baling dan digerakkan dengan motor listrik secara berkala.
- b. Mensirkulasi bahan dalam digester dengan menggunakan pompa dan dialirkan kembali melalui bagian atas digester.

Pada saat melakukan proses pengadukan hendaknya dilakukan dengan pelan. Sebagaimana diketahui bahwa tumbuhnya bakteri membutuhkan media yang cocok. Media yang cocok sendiri terbentuk dari bahan organik secara alami

dan membutuhkan waktu tertentu sehingga pengadukan yang terlalu cepat dapat membuat proses fermentasi anaerobik justru terhambat.

3. Saluran biogas

Tujuan dari saluran biogas adalah untuk mengalirkan biogas yang dihasilkan digester. Bahan untuk saluran gas disarankan terbuat dari polimer untuk menghindari korosi. Untuk pemanfaatan biogas sebagai bahan bakar masak, pada ujung saluran pipa dapat disambung dengan pipa yang terbuat dari logam supaya tahan terhadap temperatur pembakaran yang tinggi.

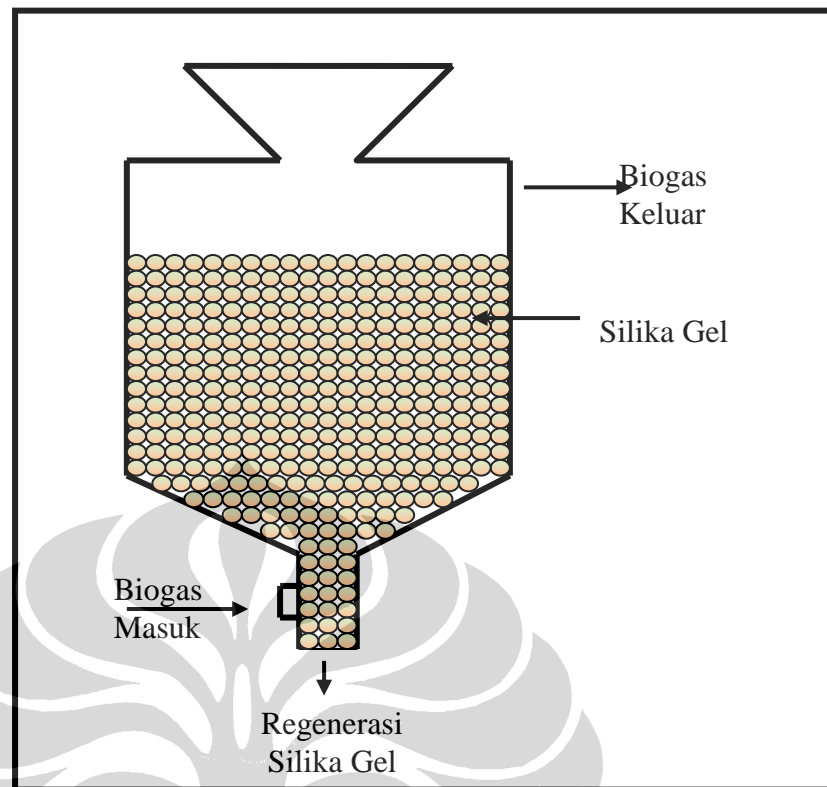
2.5.4 Teknik Pencucian Biogas

Biogas mengandung unsur-unsur yang tidak bermanfaat untuk pembakaran khususnya H_2O dan H_2S . Pada saat biogas dimanfaatkan untuk bahan bakar kompor gas rumah tangga, maka kedua unsur tersebut secara praktis tidak perlu dibersihkan. Hal ini disebabkan karena kompor hanya kontak dengan biogas pada saat dipakai saja. Alasan lain adalah proses pencucian merupakan kegiatan yang membutuhkan biaya.

Tetapi jika biogas digunakan untuk bahan bakar pembangkit listrik, maka proses pencucian menjadi sangat penting. Pencucian terhadap H_2O dan H_2S dapat memperpanjang umur dari komponen mesin pembangkit. Metode pencucian biogas terhadap H_2O dan H_2S adalah sebagai berikut:

1. Pencucian biogas dari unsur H_2O

Tujuan dari pencucian H_2O adalah karena kondensat yang terbentuk dapat terakumulasi dalam saluran gas dan dapat juga membentuk larutan asam yang korosif ketika H_2S larut dalam air (Wellinger, 2001). Pengurangan kadar H_2O yang sederhana dilakukan dengan cara melewatkan biogas pada suatu kolom yang terdiri dari silika gel atau karbon aktif. H_2O selanjutnya dapat diserap oleh silika gel atau karbon aktif.



Gambar 2.7 Teknik Pencucian Biogas dari H₂O dengan Silika Gel

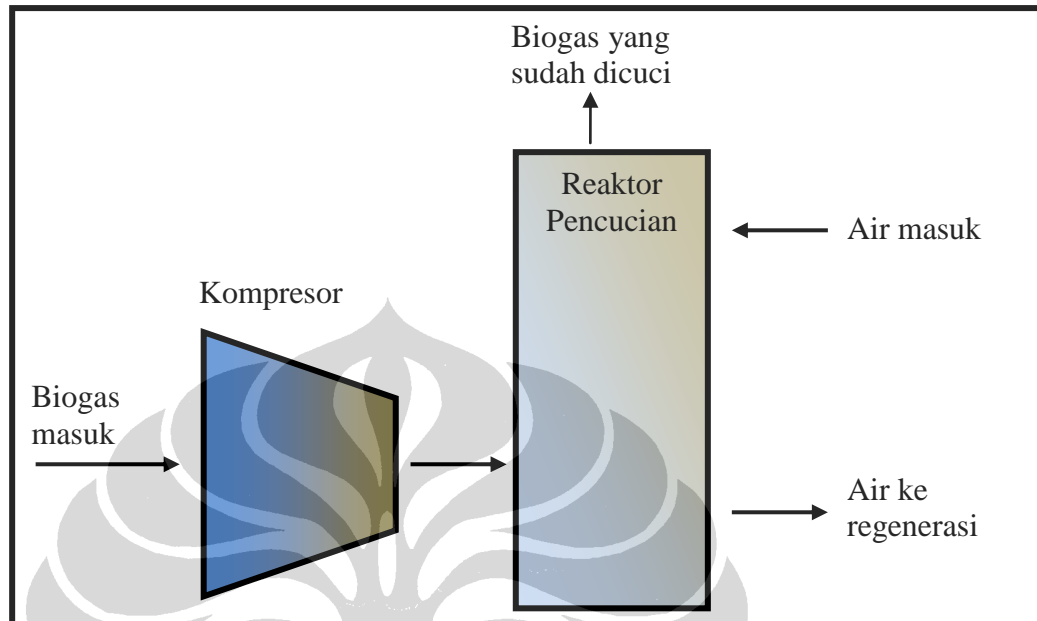
2. Pencucian Biogas dari Unsur H₂S

Secara umum, pencucian (pengurangan) H₂S dari biogas dapat dilakukan secara fisika, kimia dan biologi (Zicari, 2003). Pemurnian secara fisika misalnya penyerapan dengan air, pemisahan dengan menggunakan membran atau absorpsi dengan absorben misalnya dengan menggunakan karbon aktif. Metode fisika ini relatif mahal karena absorben sulit diregenerasi dan efektifitas pengurangan H₂S yang rendah. H₂S yang dipisahkan larutan.

Tujuan dari pencucian biogas terhadap H₂S pada dasarnya adalah (Wellinger, 2001):

- a. Mencegah korosi
- b. Menghindari keracunan H₂S (maksimum yang diperbolehkan ditempat kerja adalah 5 ppm)
- c. Mencegah kandungan sulfur dalam biogas, yang jika terbakar menjadi SO₂ atau SO₃ yang lebih beracun dari H₂S.

- d. Mengurangi SO₂ yang terbawa oleh gas buang biogas menyebabkan turunnya titik embun gas dalam cerobong.
- e. Meminimalisasi terbentuknya H₂SO₃ yang bersifat sangat korosif.



Gambar 2.8. Teknik Pencucian Biogas dari H₂S dengan *Scrubber* Air

Pemurnian H₂S dengan *scrubber* air dapat juga digunakan untuk mengurangi konsentrasi CO₂ dalam biogas (Gambar 2.8.). Metode pemurnian H₂S dengan *Scrubber* air dapat terjadi karena H₂S mempunyai kelarutan yang tinggi dalam air dibandingkan kelarutan CO₂. Air yang mengandung H₂S dan CO₂ kemudian dapat diregenerasi dan dialirkan kembali ke dalam kolom *Scrubber*. Regenerasi dapat dilakukan dengan *de-pressurizing* atau dengan melepaskan udara dalam kolom yang sama. Namun demikian, pelepasan udara tidak direkomendasikan ketika kandungan H₂S cukup tinggi karena air akan dengan cepat terkontaminasi H₂S (Wellinger, 2001). Pelepasan udara yang berlebihan juga berbahaya. Biogas yang bercampur dengan udara dapat meledak jika konsentrasinya mencapai 6-12% (tergantung dari kandungan CH₄ dalam biogas).

Pemurnian dengan cara biologi yaitu dengan menggunakan bakteri yang mampu menguraikan H₂S menjadi sulfat. Kebanyakan mikroorganisme yang digunakan untuk menguraikan H₂S adalah dari keluarga *thiobacillus*. Metode biologi ini efektif untuk mengurangi kandungan H₂S dalam biogas, tetapi metode ini selain

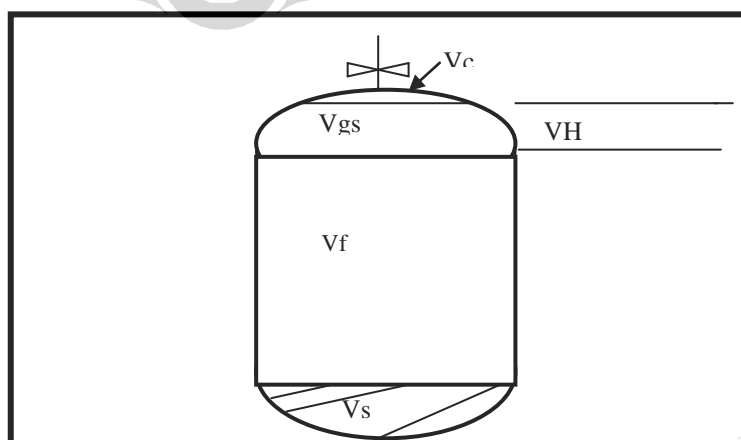
sulit dalam pengoperasian juga sangat mahal. Metode ini juga dapat menambah jumlah oksigen dalam biogas.

Pemurnian biogas dari kandungan H₂S yang sering dilakukan adalah diserap secara kimiawi. Pada metode ini H₂S bereaksi dengan larutan absorben. Selanjutnya absorben yang kaya H₂S diregenerasi untuk kembali melepas H₂S-nya dalam bentuk gas atau sulfur padat (Kohl, 1985). Absorben yang digunakan pada umumnya adalah larutan nitrit, larutan garam alkali, *slurry* besi oksida atau seng oksida dan *iron chelated solution* (Zicari, 2003; Wellinger, 2001).

2.6 Perancangan Ukuran Digester

Ukuran tangki digester biogas tergantung dari jumlah, kualitas dan jenis limbah organik yang tersedia dan temperatur saat proses fermentasi anaerobik. Jumlah bahan baku biogas yang dimasukkan dalam digester terdiri dari sampah organik dan air, sehingga pemasukan bahan baku sangat tergantung dengan seberapa banyak air yang dimasukkan kedalam digester untuk mencapai kadar bahan baku padatnya (TS) sekitar 8%. Pencampuran bahan organik untuk kotoran hewan dengan air dibuat perbandingan antara 1:3 dan 2:1. Sampah organik pasar relatif lebih banyak mengandung air sehingga perbandingan pencampuran antara sampah organik dengan air yaitu 1:2 (Uli Werner, 1989). Jumlah bahan baku $Q = \text{jumlah sampah organik} + \text{air} \dots\dots\dots(2.1)$

Di bawah ini gambar bentuk penampang silinder digester anaerob (*Cylindrical Shaped Bio-Gas Digester Body*) dengan penjelasan sebagai berikut:



Gambar 2.9 Penampang Digester Biogas Silinder

Keterangan:

V_c – Volume Ruang penampungan gas (*gas collecting chamber*)

V_{gs} – Volume Ruang Penyimpanan Gas (*gas storage chamber*)

V_f – Volume Ruang Fermentasi (*fermentation chamber*)

V_H – Volume Ruang Hidrolik (*hydraulic chamber*)

V_s – Volume lapisan penampungan lumpur (*sludge layer*)

Total volume digester $V = V_c + V_{gs} + V_f + V_s$(2.2)

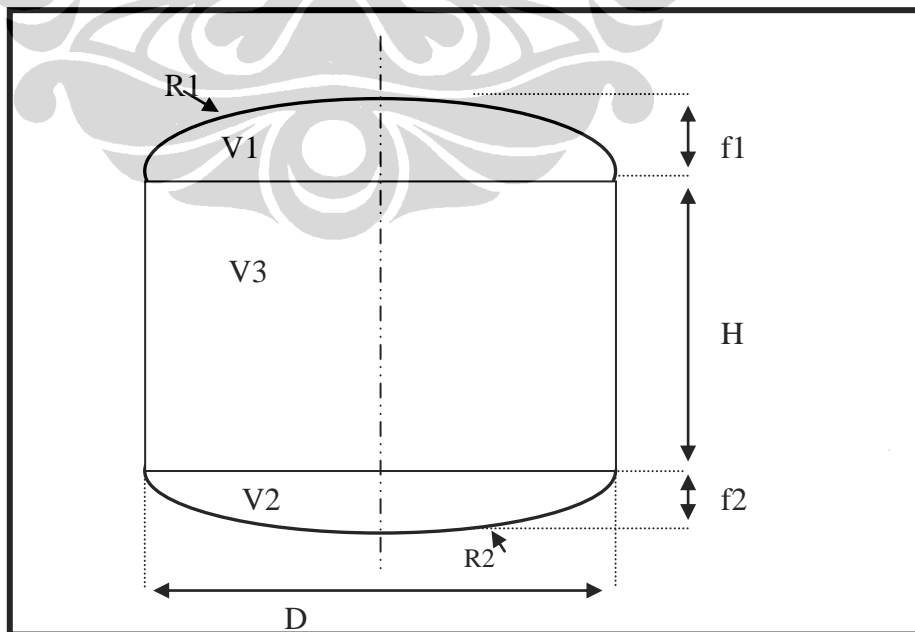
Berdasarkan jumlah volume bahan baku (Q), maka dapat ditentukan volume kerja digester (*working volume digester*) yang merupakan penjumlahan volume ruangan penyimpanan (V_{gs}) dan volume ruangan fermentasi (V_s).

Volume kerja digester = $V_{gs} + V_f$ (2.3)

dimana:

$V_{gs} + V_f = Q \times \text{HRT}$ (waktu digestifikasi)(2.4)

Untuk mendisain tangki digester biogas, dapat dilihat pada gambar dimensi geometrikal tangki digester di bawah ini:



Gambar 2.10. Dimensi Geometrikal Tanki Digester

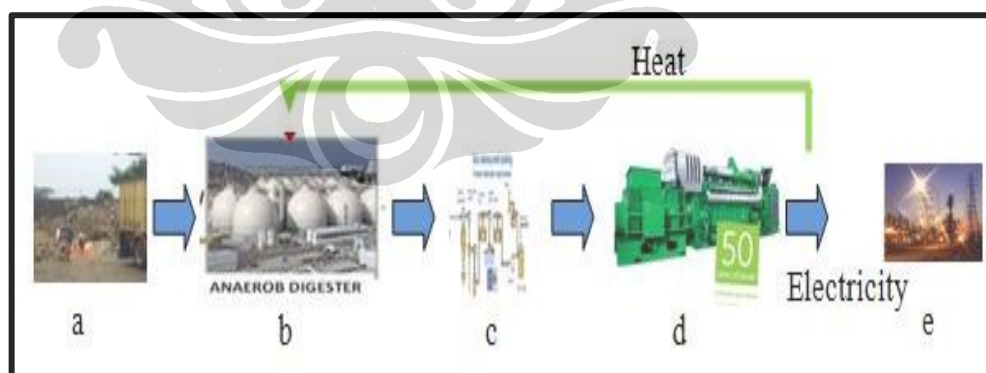
Berdasarkan gambar dimensi geometrikan tangki digester diatas berlaku ketentuan bentuk geometrikan ruangan-ruangan digester sebagai berikut :

Tabel 2.4 Dimensi Geometrikan Ukuran Tangki Digester Silinder

ISI	DIMENSI GEOMETRIKAL
$V_c \leq 5\%V$ $V_s \leq 15\%V$ $V_{gs}+V_f = 80\% V$ $V_{gs} = 0.5 (V_{gs} + V_f + V_s) K$ Dimana K = laju produksi gas tiap m ³ per hari	$D=1,3078 X V^{1/3}$ $V_1=0,0827 D^3$ $V_2 = 0,05011 D^3$ $V_3 = 0,3142 D^3$ $R_1= 0,725 D$ $R_2= 1,0625 D$ $f_1 = D/5$ $f_2 = D/8$ $S_1 = 0,911 D^2$ $S_2 = 0,8345 D^2$

2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLT Biogas)

Sistem pembangkit listrik tenaga biogas terdiri atas *waste preparation system, digester anaerob, feedstock, biogas conditioning* (untuk memurnikan kandungan metan dalam biogas), mesin pembangkit dan *electrical utilities*. Berikut ini gambar sistem penyaluran energi listrik dan panas PLT Biogas.



Gambar 2.11 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Biogas

- a. Sampah Organik Pasar; b. Digester; c. Biogas Conditioning
 d. Generator Set (Genset); e. Pemanfaatan Listrik dan Panas

Beberapa komponen pembangkit listrik biogas seperti digester dan pencucian gas telah dibahas pada tulisan-tulisan sebelumnya.

Generator Set sebagai komponen pembangkit listrik terdiri dari penggerak mula dan generator. Penggerak mula berfungsi sebagai peubah energi potensial pada biogas menjadi energi mekanik. Beberapa jenis penggerak mula yang dipakai dalam generator set adalah motor bakar, gas engine dan turbin gas.

2.7.1 Motor bakar

Merupakan salah satu mesin penggerak mula yang mempunyai peranan penting sebagai tenaga penggerak berbagai macam peralatan dari kapasitas besar maupun kecil. Jenis peralatan yang digerakkan adalah peralatan yang tidak bergerak (*stationer*) dan bergerak (*marine, aviation, automotive*).

Motor bakar terdiri dari motor dengan kerja bolak-balik (*reciprocating engines*) dan motor dengan kerja putar (*rotary engines*). Motor dengan kerja bolak-balik terdiri dari motor bensin (*otto*) dan motor diesel, dengan sistem 2 tak atau 4 tak. Perbedaan utama motor bensin (*otto*) dengan motor diesel adalah pada sistem penyalanya, dimana pada mesin diesel sistem penyalanya dengan campuran bahan bakar dan udara yang ditekan (*presurized*) sedangkan pada mesin bensin dinyalakan dengan bantuan loncatan api listrik antara kedua elektroda busi (*spark ignition*).

2.7.1.1 Modifikasi Motor Bakar Berbahan Bakar Biogas

Pada sistem motor bakar perubahan biogas menjadi energi listrik dilakukan dengan memasukkan biogas kedalam *conversion kit* yang berfungsi menurunkan tekanan gas dari tabung penyimpanan sesuai dengan tekanan operasional mesin dan mengatur debit gas yang bercampur dengan udara di dalam *mixer*, dari *mixer* biogas bersama dengan udara masuk kedalam mesin dan terjadilah pembakaran yang akan menghasilkan daya untuk menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Modifikasi mesin bensin hampir sama dengan mesin diesel (di Indonesia Genset berbahan Bakar diesel biasa disebut PLTD, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) yaitu dengan cara menambah *conversion kit* dan *mixer*.

Perbedaannya adalah pada mesin bensin bahan bakar biogas dapat digunakan 100%, hal ini dikarenakan adanya busi busi sehingga bahan bakar biogas akan cepat terbakar. Karakteristik pembakaran yang terjadi pada mesin diesel berbeda dengan mesin bensin sebagaimana berikut.

2.7.1.2 Karakteristik Pembakaran Biogas didalam Motor Bakar

- Karakteristik pembakaran biogas didalam mesin diesel

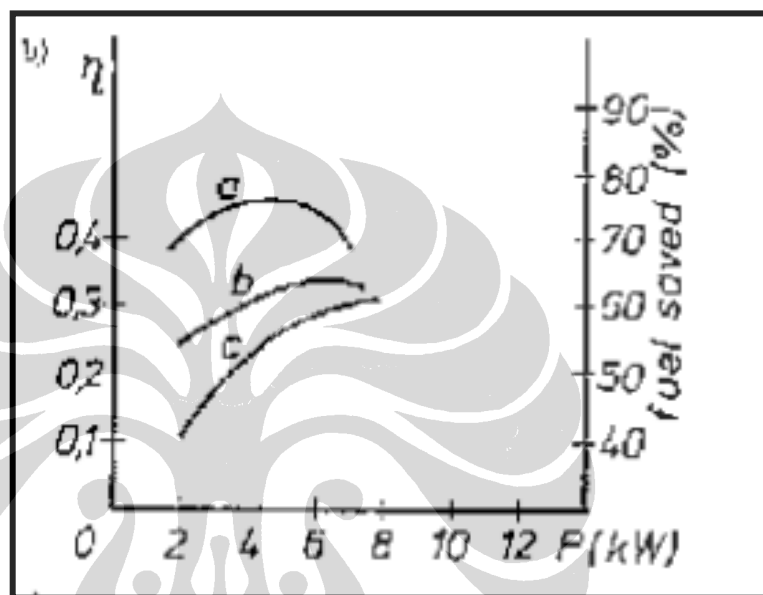
Mesin diesel adalah mesin pembakaran dalam yang proses pembakarannya memerlukan tingkat kompresi udara yang tinggi. Mesin diesel adalah jenis penggerak mula yang paling umum digunakan dalam sistem kogenerasi. Mesin ini secara meluas telah banyak digunakan pada industri dan instansi komersial baik untuk mengoperasikan generator ataupun untuk mengoperasikan peralatan berputar yang lainnya seperti kompresor, pompa dan blower. Mesin jenis ini umumnya menggunakan bahan bakar minyak (cair) dan gas.

Pada mesin diesel, metode pembakaran bahan bakar dilakukan dengan menghisap udara untuk kemudian dimampatkan sampai mencapai tekanan dan suhu yang tinggi dan saat itu bahan bakar akan menyala dengan sendirinya dan membentuk proses pembakaran.

Walaupun untuk mesin diesel ini tidak diperlukan sistem pengapian tetapi sebagai gantinya diperlukan pompa injeksi dan alat pengabut (nozzle) untuk menyembrotkan bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan dalam hal ini harus berupa minyak ringan yang memungkinkan dapat terjadi pembakaran sendiri (self ignition).

Bahan bakar biogas membutuhkan rasio kompresi yang tinggi untuk proses pembakaran sebab biogas mempunyai titik nyala yang tinggi 645° - 750° C dibandingkan titik nyala solar 220° C, maka mesin diesel umumnya digunakan secara *dual fuel*. Proses pembakaran pada mesin *dual fuel*, bahan bakar biogas dan udara masuk ke ruang bakar pada saat langkah hisap dan kemudian dikompresikan didalam silinder seperti halnya udara dalam mesin diesel biasa. Bahan bakar solar dimasukkan lewat nosel pada saat mendekati akhir langkah kompresi, dekat titik mati atas (TMA) sehingga terjadi pembakaran.

Temperatur awal kompresi tidak boleh lebih dari 80°C karena akan menyebabkan terjadinya *knocking* dan peristiwa *knocking* pada mesin *dual fuel* sama dengan yang terjadi pada mesin bensin, yaitu terjadinya pembakaran yang lebih awal akibat tekanan yang lebih tinggi dari mesin diesel. Hal ini disebabkan karena bahan bakar biogas masuk bersama-sama dengan udara ke ruang bakar, sehingga yang dikompresikan tidak hanya udara tapi juga biogas.



Gambar 2.12 Grafik Efisiensi Mesin diesel

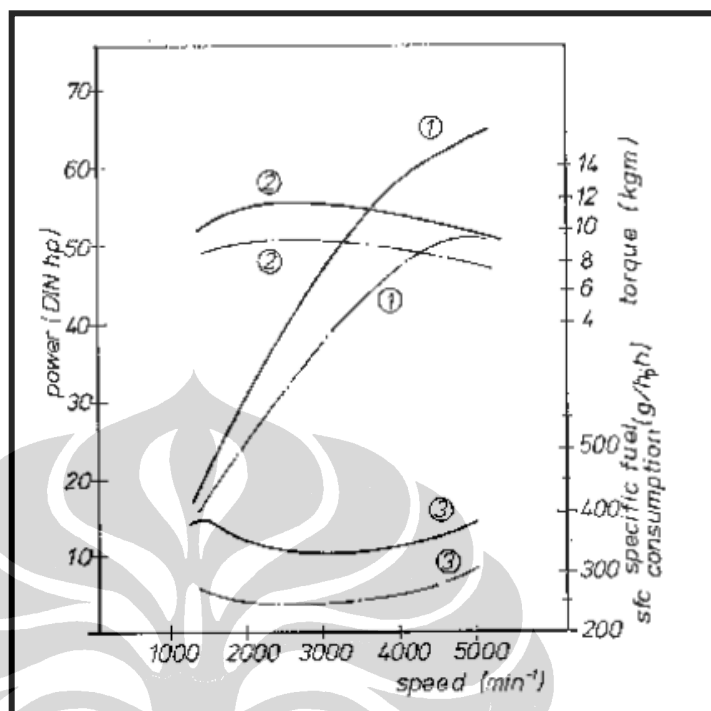
- a. mesin diesel dengan solar yang diiritkan;
- b. efisiensi mesin diesel
- c. efisiensi *dual fuel*

Berdasarkan gambar 2.12 grafik efisiensi mesin diesel diatas, pada penggunaan mesin diesel dengan sistem dual fuel mempunyai efisiensi tertinggi sekitar 30%.

- Karakteristik pembakaran biogas didalam mesin Bensin

Mesin bensin dengan rasio kompresi rendah tidak cukup untuk melakukan pembakaran biogas karena titik nyala biogas yang tinggi yang hanya berkisar antara 645°C - 750°C , untuk itu dilakukan penambahan rasio kompresi sehingga proses pembakaran biogas sama dengan pembakaran pada mesin bensin

normal, yaitu biogas dan udara masuk ke ruang bakar dan pada akhir langkah kompresi terjadi pembakaran karena bantuan loncatan bunga api busi.



Gambar 2.13 Diagram Performance mesin bensin dengan bahan bakar bensin (—) dan biogas (- - -). 1. Daya; 2. Torsi; 3. Konsumsi bahan bakar spesifik

Pada mesin bensin rata-rata efisiensi untuk penggunaan biogas sebagai bahan bakar adalah sekitar 25% (Klaus von Mitzlaff, 1988).

2.7.2 Gas Engine

Prinsip Kerja gas engine sama dengan motor bakar berbahan bensin, pada gas engine bahan bakar yang digunakan adalah gas. Bahan bakar gas yang dapat digunakan adalah gas alam, minyak dan biogas yang dihasilkan oleh proses konversi seperti gasifikasi batubara maupun hasil gasifikasi melalui pirolisis atau anaerobik digestifikasi biomassa. Perbedaan dengan motor bensin adalah sistem pengkabutan pada karburator, pada gas engine karburator tidak berfungsi sebagai pengkabut karena bentuk bahan bakarnya sudah berupa fase gas.

Udara yang bercampur dengan gas didalam karburator masuk melalui saluran *intake* ke ruang pembakaran, pada saat bersamaan melalui percikan bunga api *spark plug* (busi) terjadilah pembakaran yang menghasilkan tenaga gerak.

Dewasa ini produk-produk gas engine secara luas telah digunakan untuk pembangkitan skala kecil sampai atas. Dibandingkan dengan mesin penggerak mula lain, gas engine memiliki efisiensi yang lebih tinggi. Dengan kemajuan teknologi saat ini beberapa produk gas engine memiliki efisiensi diatas 39,8%. Selain memiliki efisiensi tinggi, gas buang yang dihasilkan gas engine memiliki karakteristik yang lebih ramah lingkungan.

2.7.3 Turbin Gas

Turbin gas sebagai penggerak mula untuk memutar generator sehingga menghasilkan listrik. Berbeda dengan motor bakar, pada turbin gas, panas yang dihasilkan dari membakar biogas digunakan untuk memutar turbin dan turbin dikopel dengan generator untuk menghasilkan energi listrik yang dialirkan ke beban. Panas sisa yang dihasilkan setelah dimanfaatkan turbin digunakan kembali oleh *recuperator* dan *exhaust heat recovery* untuk berbagai macam keperluan, seperti sebagai pemanas air untuk sistem air panas hotel.

Ukuran turbin gas bisa berkurang dari 1 MW hingga sekitar 100 MW. Kemajuan pesat pada teknologi ini menghasilkan penurunan yang signifikan, baik pada biaya instalasi maupun emisi yang dikeluarkan. Bahan bakar yang dapat digunakan adalah gas alam, minyak dan gas bakar yang dihasilkan oleh proses konversi seperti gasifikasi batubara maupun hasil gasifikasi melalui pirolisis atau anaerobik digestifikasi biomassa.

2.7.3.1 Komponen Utama Turbin Gas

Gas-turbine engine adalah suatu alat yang memanfaatkan gas sebagai fluida untuk memutar turbin dengan pembakaran internal. Didalam turbin gas energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik melalui udara bertekanan yang memutar roda turbin sehingga menghasilkan daya. Sistem turbin gas yang paling sederhana terdiri dari tiga komponen yaitu kompresor, ruang bakar dan turbin gas.

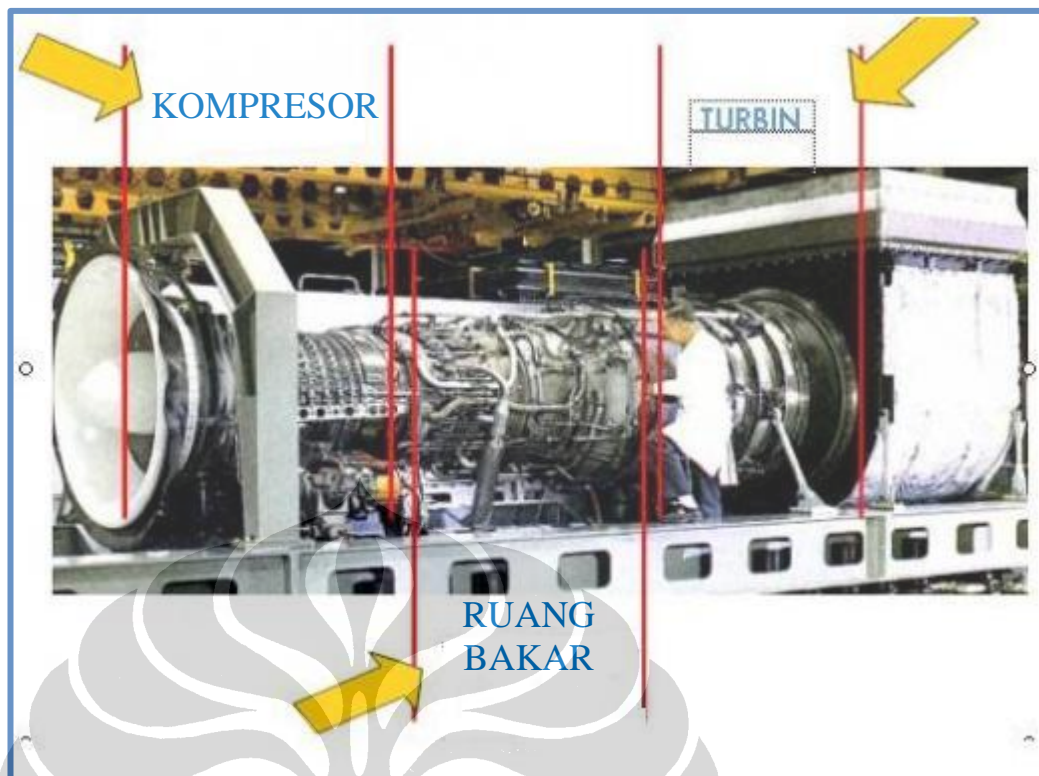
1. Kompresor
Menaikkan tekanan udara dari penyimpan gas ke ruang bakar
2. Ruang bakar *Combustion Area*
Membakar bahan bakar yang masuk dan menghasilkan tekanan yang sangat tinggi begitu pula dengan kecepatannya.
3. Turbin
Mengkonversi energi dari gas dengan tekanan dan kecepatan yang tinggi hasil dari combustion area menjadi energi mekanik berupa rotasi poros turbin.

2.7.3.2 Prinsip kerja Turbin Gas

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (*inlet*). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar. Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik, dll. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (*exhaust*).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (*compression*) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (*combustion*) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuai (*expansion*) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (*nozzle*).
4. Pembuangan gas (*exhaust*) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.



Gambar 2.14 Bagian-bagian Utama Turbin Gas

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

- Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (*pressure losses*) di ruang bakar.
- Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
- Berubahnya nilai C_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
- Adanya *mechanical loss*, dsb.

Pada pembangkit listrik dengan turbin gas sebagai penggerak mula, mempunyai efisiensi untuk konversi listrik sebesar 24-35 % (ESCAP Report. *Guide Book on Coogeneration*, 2000).

Pemanfaatan turbin gas cocok untuk digunakan pada sistem dengan kebutuhan daya listrik yang besar dan kontinyu.

Turbin gas memiliki beberapa keuntungan diantaranya:

- Ukuran yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan turbin uap
- Dapat menggunakan berbagai variasi bahan bakar
- Hasil pembuangannya lebih bersih sehingga lebih bersahabat dengan lingkungan
- Tingkat keandalannya lebih tinggi
- Mudah perawatannya
- Dapat mensuplai daya secara cepat dan tidak memerlukan adanya pemanasan (*warm up period*)

2.7.4 Generator

Generator berfungsi mengubah energi mekanis menjadi listrik. Daya mekanis putaran yang dihasilkan melalui penggerak mula diubah menjadi oleh generator menjadi daya listrik. Pada suatu sistem pembangkit listrik, Generator yang umumnya digunakan adalah generator sinkron. Generator sinkron terdiri dari rangkaian rotor yang berupa inti dengan lilitan medan dan rangkaian stator yang berupa kumparan jangkar 3 fasa.

Dewasa ini produk generator merupakan satu kesatuan dengan penggerak mula, sehingga dalam pemilihan generator ditentukan berdasarkan jenis bahan bakar penggerak mula serta spesifikasi teknis seperti kapasitas, frekuensi dan tegangan yang diinginkan.