

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1. Sumber Energi Biogas

Biogas adalah campuran gas yang dihasilkan oleh bakteri metanogenik apabila bahan organik mengalami proses fermentasi dalam reaktor (digester) dalam kondisi *anaerob* (tanpa udara). Bahan organik yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan biogas adalah kotoran hewan, kotoran manusia, dan sampah bio (organik). Komposisi biogas bervariasi tergantung pada limbah organik dan proses fermentasi *anaerob*, biasanya terdiri dari gas metana (50-70%), gas karbon dioksida (30-40%), dan gas-gas lainnya, meliputi karbon monoksida, nitrogen, hidrogen, hidrogen sulfida, dan oksigen. Karakteristik komposisi lengkap kandungan biogas dapat ditunjukkan pada Tabel 2.1.

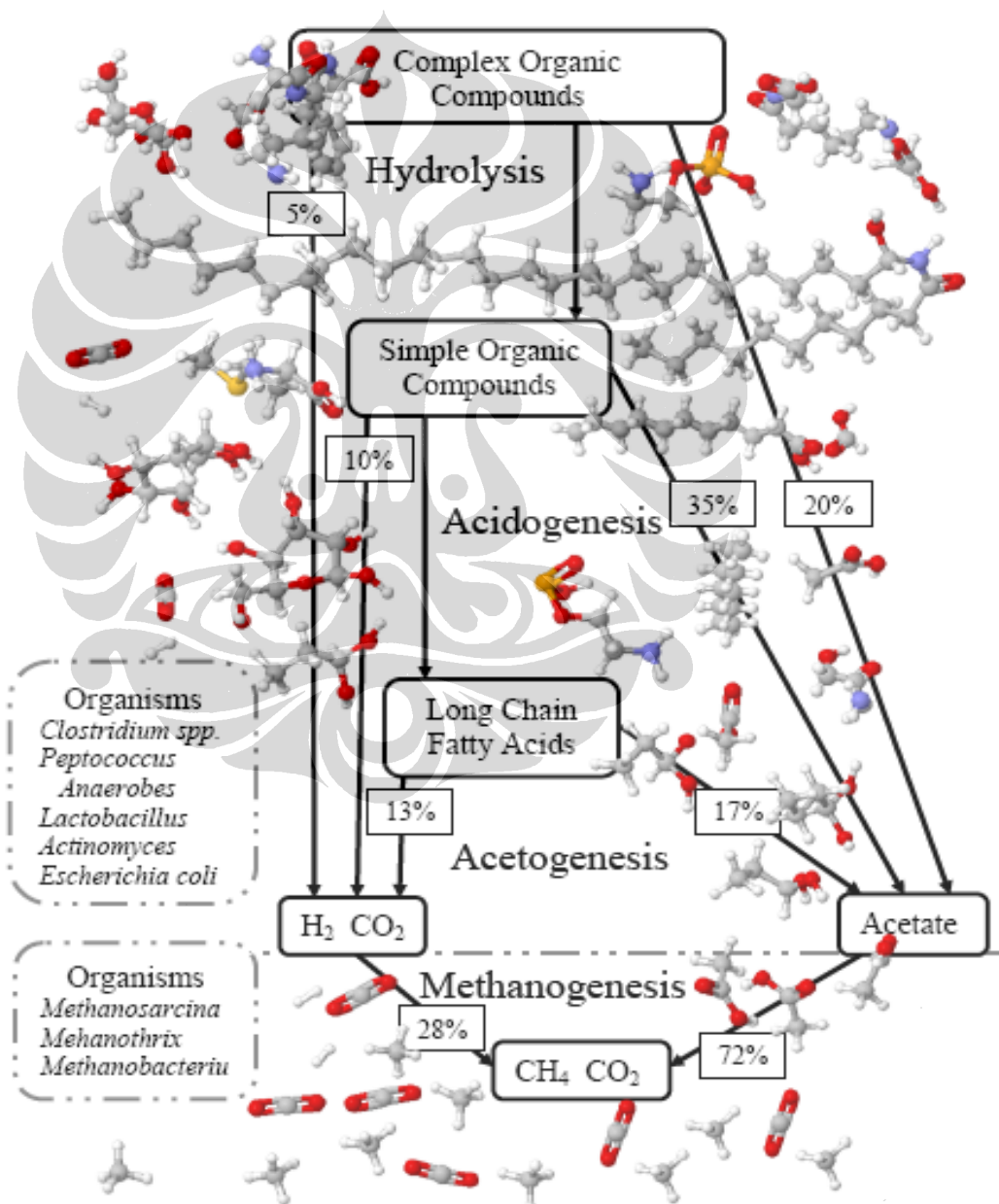
Tabel 2.1. Komposisi Kandungan Biogas^[4]

Gas	Simbol	(% volume)
Metana	CH ₄	55 – 75
Karbon dioksida	CO ₂	25 – 45
Karbon monoksida	CO	0 – 0,3
Nitrogen	N ₂	1 – 5
Hidrogen	H ₂	0 – 3
Hidrogen sulfide	H ₂ S	0,1 – 0,5
Oksigen	O ₂	Sisanya

Biogas dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar konvensional yang sudah umum digunakan seperti minyak tanah (*kerosene*) atau kayu bakar, serta penggunaan biogas juga meyelamatkan lingkungan dari pencemaran dan mengurangi kerusakan lingkungan hidup. Saat ini pemanfaatan biogas menjadi penting ditengah isu pemanasan global karena gas metan sebagai kandungan utama dalam biogas memberikan efek rumah kaca (*green house gases*) yang 21 kali lebih bersifat polutan daripada gas CO₂.

2.2. Proses Fermentasi Biogas

Proses fermentasi atau proses pencernaan mengacu berbagai reaksi dan interaksi yang terjadi diantara bakteri *metanogen* dan *non-metanogen* dan bahan organik yang diumpukan ke dalam pencerna sebagai input. Ini adalah fisiokimia yang kompleks dan proses biologis melibatkan berbagai faktor dan tahapan bentuk. Penghancuran input yang merupakan bahan organik dicapai dalam 3 (tiga) tahapan, yaitu: (a) tahap hidrolisis, (b) tahap pengasaman (*acidification*), dan (c) tahap pembentukan gas CH_4 (*methanization*) seperti terlihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Tahapan Proses Fermentasi Bahan Organik^[4]

- Tahap pertama: tahap hidrolisis

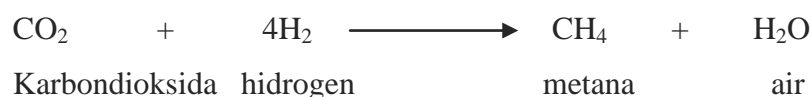
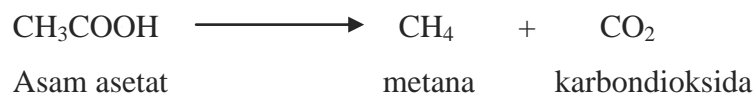
Pada tahap ini, bahan-bahan organik yang mengandung selulosa, hemiselulosa dan bahan ekstraktif seperti protein, karbohidrat dan lipida akan diurai menjadi senyawa dengan rantai yang lebih pendek. Sebagai contoh polisakarida terurai menjadi monosakarida, sedangkan protein terurai menjadi peptida dan asam amino. Pada tahap ini, mikroorganisme yang berperan adalah enzim ekstraselular seperti *selulose*, *amilase*, *protease* dan *lipase*.

- Tahap kedua: tahap pengasaman

Pada tahap ini, bakteri akan menghasilkan asam yang akan berfungsi untuk mengubah senyawa pendek hasil hidrolisis menjadi asam asetat (CH_3COOH), H_2 dan CO_2 . Bakteri ini merupakan bakteri anaerob yang dapat tumbuh pada keadaan asam dengan pH 5,5-6,5. Bakteri ini bekerja secara optimum pada temperatur sekitar 30°C . Selain itu, bakteri tersebut juga mengubah senyawa yang bermolekul rendah menjadi alkohol, asam organik, asam amino, CO_2 , H_2S dan gas CH_4 .

- Tahap ketiga: tahap pembentukan gas CH_4

Pada tahap pembentukan gas CH_4 ini, bakteri yang berperan adalah bakteri *methanogenesis* (bakteri metana), yaitu dari jenis *methanobacterium*, *methanobacillus*, *methanosacaria*, dan *methanococcus*. Bakteri ini membutuhkan kondisi digester yang benar-benar kedap udara dan gelap. Temperatur dimana bakteri ini bekerja secara optimum adalah pada 35°C dengan kisaran pH adalah 6,5-7,5. Pada akhir metabolisme dihasilkan CH_4 dan CO_2 dari gas H_2 , CO_2 dan asam asetat yang dihasilkan pada tahap pengasaman. Reaksi dalam proses pembentukan gas CH_4 dapat digambarkan sebagai berikut:



2.3. Faktor-Faktor Dalam Proses Fermentasi Biogas^{[4][5]}

2.3.1. Suhu

Temperatur sangat menentukan lamanya proses pencernaan di digester. Bila temperatur meningkat, umumnya produksi biogas juga meningkat sesuai dengan batas-batas kemampuan bakteri mencerna sampah organik. Bakteri yang umum dikenal dalam proses fermentasi anerob seperti bakteri Psychrophilic (< 15°C), bakteri Mesophilic (15 °C-45 °C), Bakteri Thermophilic (45 °C-65 °C)

Umumnya digester anaerob skala kecil, yang sering terdapat disekitar kita umumnya bekerja pada suhu bakteri Mesophilic dengan suhu antara 25 °C-37°C.

2.3.2. Rasio C/N

Apabila rasio C/N sangat tinggi, nitrogen akan dikonsumsi sangat cepat oleh bakteri metanogen dan mengakibatkan produksi metan akan menjadi rendah. Sebaliknya, apabila rasio C/N sangat rendah, nitrogen akan bebas dan berakumulasi dalam bentuk amoniak (NH₄). NH₄ akan meningkatkan derajat keasaman (pH) bahan dalam digester yang berakibat racun pada populasi bakteri metanogen. Proses fermentasi anaerob akan berlangsung optimum bila rasio C/N bernilai 30:1, dimana jumlah karbon 30 kali dari jumlah nitrogen.

Tabel 2.2. Rasio C/N Dari Beberapa Bahan Organik^[5]

Bahan	Rasio C/N
Kotoran bebek	8
Kotoran manusia	8
Kotoran ayam	10
Kotoran kambing	12
Kotoran babi	18
Kotoran domba	19
Kotoran kerbau/sapi	24
Kotoran Gajah	43
Jerami (jagung)	60
Jerami (padi)	70
Jerami (gandum)	90
Tahi gergajian	di atas 200

Bahan organik dengan rasio C/N tinggi dapat dicampur dengan bahan organik dengan rasio C/N-nya rendah sehingga diperoleh nilai C/N yang ideal.

2.3.3. Nilai pH

Produksi biogas secara optimum dapat dicapai bila nilai pH dari campuran input di dalam digester berada pada kisaran 6 dan 7. Nilai pH lebih kecil atau lebih besar dari kisaran akan mempunyai sifat racun terhadap bakteri metanogen. Ketika produksi metana dalam kondisi stabil, kisaran nilai pH adalah 7,2 - 8,2.

2.3.4. Lingkungan Anaerob

Keadaan anaerob adalah keadaan lingkungan dimana tidak terjadi kontak langsung dengan oksigen (O_2). Udara yang mengandung O_2 jika memasuki digester dapat menyebabkan penurunan produksi metana. Hal ini disebabkan karena bakteri anaerob membutuhkan kondisi kedap udara, sehingga jika terdapat udara yang mengandung O_2 menyebabkan bakteri berkembang tidak sempurna.

2.3.5. Kebutuhan Nutrisi

Bakteri anaerob membutuhkan beberapa bahan nutrisi tertentu dan sedikit logam. Kekurangan salah satu nutrisi atau bahan logam yang dibutuhkan dapat memperkecil proses produksi metana. Nutrisi yang diperlukan antara lain Nitrogen, Sulfur, Fosfor, Potasium, Kalsium, Magnesium dan sejumlah logam seperti Besi, Mangan, Seng, Kobalt, Selenium, Nikel, dan lainnya. Nutrisi ini dapat menghambat proses pembentukan biogas apabila konsentrasi di dalam bahan terlalu banyak.

Tabel 2.3. Batasan Konsentrasi Zat Yang Diijinkan Dalam Digester^[4]

Zat	Konsentrasi (mg/l)
Tembaga	10 – 250
Kalsium	8000
Sodium	8000
Magnesium	3000
Nikel	100 – 1000
Seng	350 – 1000
Chromium	200 – 2000
Sulfur	200
Cyanida	2

2.3.6. Lama Waktu Pencernaan

Lama waktu pencernaan merupakan waktu material organik berada di dalam tangki digester. Selama proses ini terjadi pertumbuhan bakteri anaerob pengurai, proses penguraian material organik, dan stabilisasi pembentukan biogas menuju kepada kondisi optimumnya. Secara keseluruhan, lama waktu penguraian (*Hydraulic Retention Time-HRT*) mencakup 70%-80% dari keseluruhan waktu proses pembentukan biogas bila siklus pembentukan biogas berjalan ideal yakni 1 kali proses pemasukan material organik langsung mendapatkan biogas. sebagai proses akhirnya.

2.3.7. Pengadukan

Pengadukan dilakukan untuk menjaga total partikel padat tidak mengendap pada dasar digester. Jika terlalu pekat, partikel-partikel menghambat aliran gas yang terbentuk pada bagian bawah digester. Sebagai akibatnya, produksi gas lebih sedikit daripada perolehan optimum.

2.3.8. Total Solid Content (TS)

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. TS juga mengindikasikan banyaknya padatan dalam bahan organik dan nilai TS sangat mempengaruhi lamanya proses pencernaan bahan organik.

2.3.9. Volatile Solids (VS)

Merupakan bagian padatan (*total solid-TS*) yang berubah menjadi fase gas pada tahapan asidifikasi dan metanogenesis sebagaimana dalam proses fermentasi limbah organik. Dalam pengujian skala laboratorium, berat saat bagian padatan bahan organik yang hilang terbakar (menguap dan mengalami proses gasifikasi) dengan pembakaran pada suhu 538° C, disebut sebagai *volatile solid*.

2.4. Digester^{[4][5]}

Digester merupakan komponen utama dalam produksi biogas. Digester merupakan tempat dimana material organik diurai oleh bakteri secara *anaerob* (tanpa udara) menjadi gas CH_4 dan CO_2 . Semakin besar kandungan CH_4 dalam biogas, semakin besar kandungan energi dalam biogas. Pada umumnya, biogas dapat terbentuk pada 4-5 hari setelah digester diisi. Produksi biogas yang terbentuk umumnya terjadi pada 30-35 hari dan kemudian produksinya turun jika digester tidak diisi kembali.

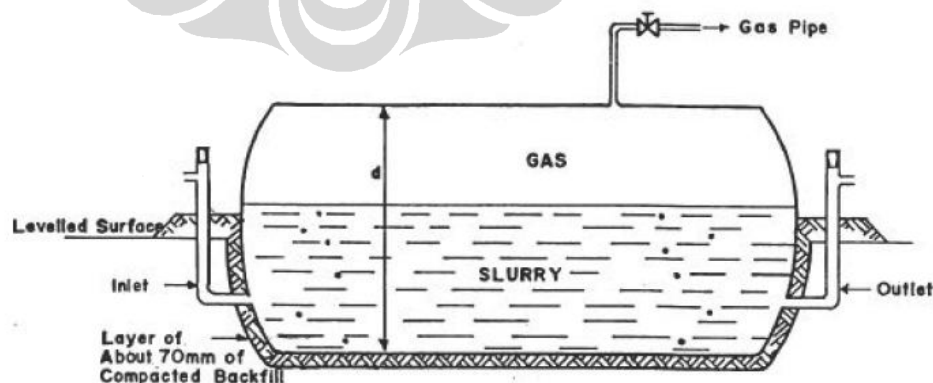
2.4.1. Jenis-Jenis Digester

Terdapat beberapa jenis digester yang dapat dilihat, yaitu jenis digester berdasarkan konstruksi, dan jenis digester berdasarkan jenis alirannya.

2.4.1.1. Berdasarkan Konstruksi

1- Tipe balon

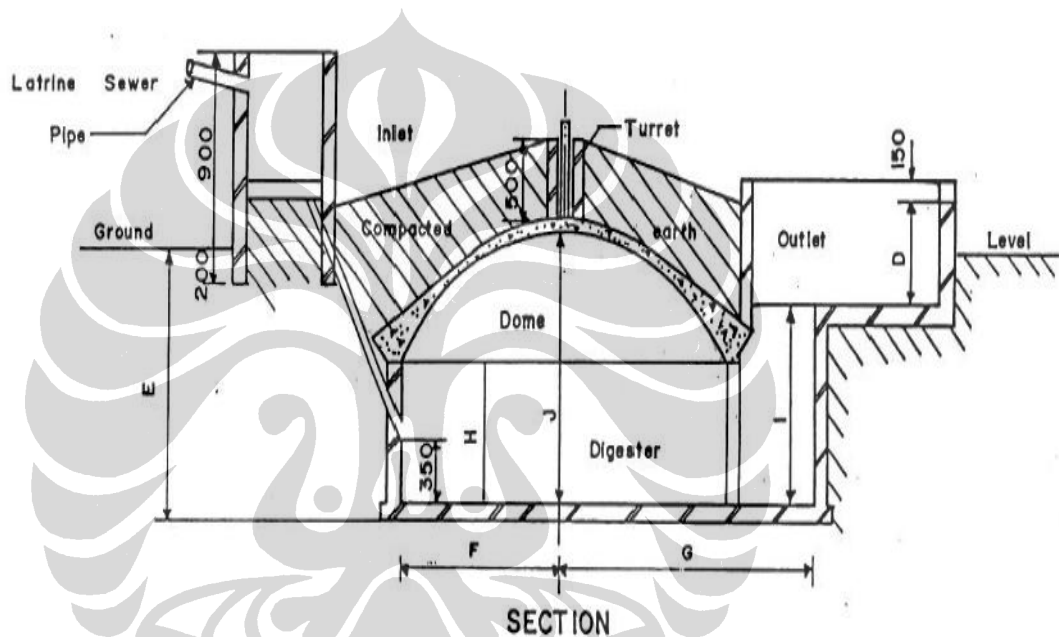
Digester tipe ini paling banyak digunakan pada skala rumah tangga yang menggunakan bahan plastik sehingga lebih efisien dalam penanganan dan perubahan tempat biogas. Digester ini terdiri atas satu bagian yang berfungsi sebagai digester dan penyimpanan gas masing – masing bercampur dalam satu ruangan tanpa sekat. Material organik terletak di bagian bawah karena memiliki berat yang lebih besar dibandingkan gas yang akan mengisi pada rongga atas.



Gambar 2.2. Digester Tipe Balon

2- Tipe kubah tetap (*fixed dome*)

Digester tipe ini disebut juga tipe Cina, karena tipe ini dibuat pertama kali di China sekitar tahun 1930-an. Digester tipe ini memiliki dua bagian, yaitu digester sebagai tempat pencerna material biogas dan sebagai rumah bagi bakteri, dan bagian yang kedua adalah kubah tetap (*Fixed Dome*). Dinamakan kubah tetap karena bentuknya menyerupai kubah dan bagian ini merupakan pengumpul gas yang tidak bergerak (*fixed*). Gas yang dihasilkan dari material organik pada digester akan mengalir dan disimpan di bagian bawah.



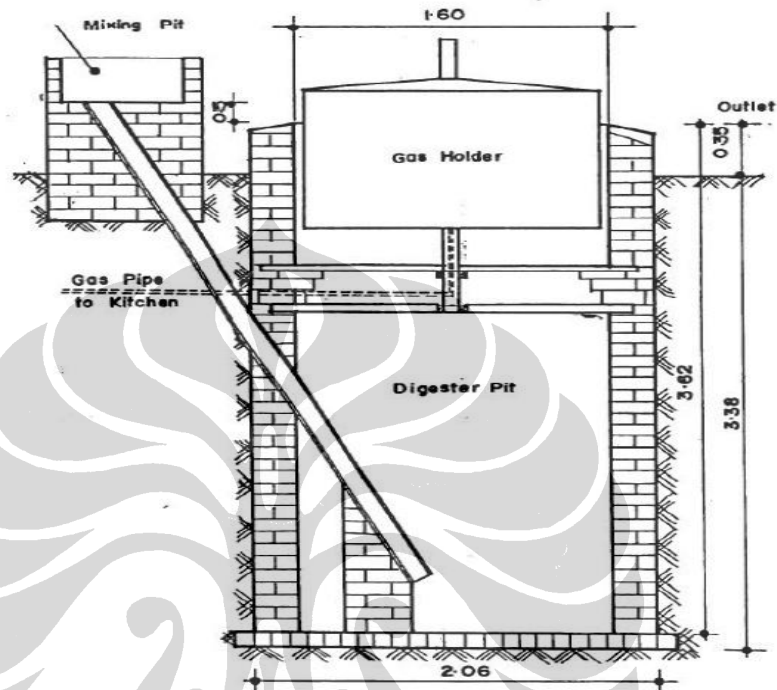
Gambar 2.3. Digester Tipe Kubah Tetap (*Fixed Dome*)^[4]

Keuntungan dari tipe ini adalah biaya konstruksi lebih murah daripada menggunakan tipe kubah apung, karena tidak memiliki bagian yang bergerak menggunakan besi yang tentu harganya relatif lebih mahal dan perawatannya lebih mudah, sedangkan kerugiannya adalah seringnya terjadi kehilangan gas pada bagian kubah karena konstruksi tetapnya.

3- Tipe kubah apung (*floating dome*)

Digester tipe kubah apung pertama kali dikembangkan di India pada tahun 1937 sehingga dinamakan dengan tipe India. Memiliki bagian digester yang sama dengan tipe kubah tetap (*fixed dome*), perbedaannya terletak pada bagian

penampung gas menggunakan peralatan bergerak menggunakan drum. Drum ini dapat bergerak naik turun yang berfungsi untuk menyimpan gas hasil fermentasi dalam digester. Pergerakan drum mengapung pada cairan dan tergantung dari jumlah gas yang dihasilkan.



Gambar 2.4. Digester Tipe Kubah Apung (*Floating Dome*)^[4]

Keuntungan dari tipe ini adalah dapat melihat secara langsung volume gas yang tersimpan pada drum karena pergerakannya. Karena tempat penyimpanan yang terapung sehingga tekanan gas konstan. Sedangkan kerugiannya adalah biaya material konstruksi dari drum lebih mahal. Faktor korosi pada drum juga menjadi masalah sehingga bagian pengumpul gas pada reaktor ini memiliki umur yang lebih pendek dibandingkan menggunakan tipe kubah tetap (*fixed dome*).

2.4.1.2. Berdasarkan Proses Pengolahan Limbah Organik

Berdasarkan proses pengolahan limbah organik dikenal beberapa tipe digester seperti *batch* digester, *plug flow* digester dengan proses daur ulang, digester pengadukan penuh (CFSTR), dan digester anaerob dengan pengadukan berkala (CSTR).

Proses pengolahan limbah organik dengan digester tipe *batch* dilakukan sekali proses yakni memasukan limbah organik, *digestion* dan penghasiian biogas dan *slurry* (lumpur) kompos yang kaya nutrisi bagi tanah. Digester tipe *plug flow* dapat melakukan proses *digestion* (pencernaan limbah organik) beberapakali. Sementara digester tipe CFSTR dan CSTR menggunakan pengadukan untuk mempercepat waktu cerna (HRT) dalam tangki digester *anaerob*.

2.4.2. Komponen Digester

Komponen digester cukup banyak dan bervariasi tergantung pada jenis digester yang digunakan dan tujuan pembangunan digester. Secara umum digester terdiri dari: komponen utama dan komponen pendukung digester.

2.4.2.1. Komponen Utama Digester

1- Saluran masuk *slurry*

Saluran ini digunakan untuk memasukkan campuran bahan baku limbah organik dengan air. Tujuan pencampuran adalah untuk memaksimalkan produksi biogas, memudahkan mengalirnya bahan baku dan menghindari terbentuknya endapan pada saluran masuk.

2- Ruang fermentasi (*digestion*)

Ruangan *digestion* berfungsi sebagai tempat terjadinya proses *digestion* dan dibuat kedap terhadap udara. Ruangannya ini dapat juga dilengkapi dengan penampung biogas.

3- Saluran keluar residu (*sludge*)

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

4- Tangki penyimpan biogas

Tujuan dari tangki penyimpan gas adalah untuk menyimpan biogas yang dihasilkan dari proses *digestion*. Jenis tangki penyimpan biogas ada dua, yaitu: tangki bersatu dengan unit digester (tipe *fixed dome*) dan terpisah dengan unit digester (tipe *floating dome*). Untuk tangki terpisah, konstruksi dibuat khusus sehingga tidak bocor dan tekanan yang terdapat dalam tangki seragam.

2.4.2.2. Komponen Pendukung Digester

1- Katup pengaman tekanan

Fungsi dari katub pengaman adalah sebagai pengaman digester dari lonjakan tekanan biogas yang berlebihan. Bila tekanan biogas dalam tabung penampung biogas lebih tinggi dari tekanan yang diijinkan, maka biogas akan dibuang keluar, selanjutnya tekanan dalam digester turun kembali. Katup pengaman tekanan cukup penting dalam digester biogas yang besar, karena umumnya digester dibuat dari material yang tidak tahan pada tekanan yang tinggi.

2- Sistem pengaduk

Tujuan dari sistem pengaduk adalah untuk mengurangi pengendapan dan menyediakan populasi bakteri yang seragam yang diperlukan untuk terjadinya proses *digestion*. Dengan pengadukan dapat mempermudah pelepasan gas yang dihasilkan oleh bakteri menuju ke bagian penampung biogas. Pengadukan dapat dilakukan dengan:

- Pengadukan mekanis: yaitu dengan menggunakan poros yang di bawahnya terdapat semacam baling-baling dan digerakkan dengan motor listrik secara berkala.
- Pengadukan dengan sirkulasi: mensirkulasi bahan dalam digester dengan menggunakan pompa dan dialirkan kembali melalui bagian atas digester.

3- Saluran biogas

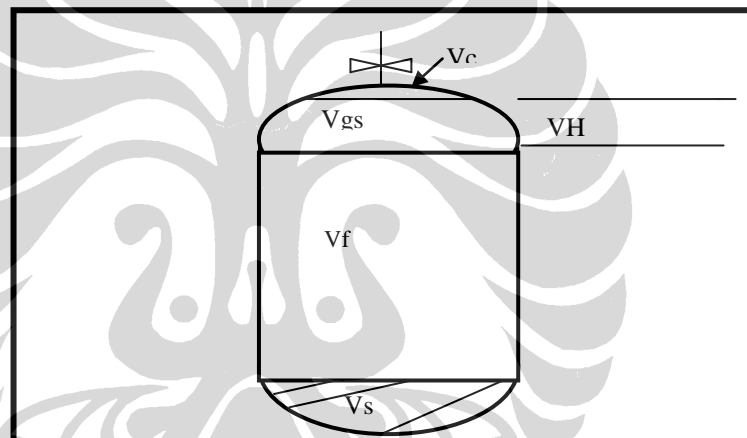
Tujuan dari saluran gas adalah untuk mengalirkan biogas yang dihasilkan dari digester. Bahan untuk saluran gas disarankan terbuat dari polimer untuk menghindari korosi.

2.4.3. Perancangan Ukuran Digester^[7]

Ukuran tangki digester tergantung dari jumlah, kualitas dan jenis limbah organik yang tersedia dan temperatur saat proses fermentasi *anaerob*. 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 1:2 (Uli Werner, 1989).

$$\text{Jumlah bahan baku } Q = \text{jumlah sampah organik} + \text{air} \quad (2.1)$$

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



Gambar 2.5. Penampang Digester Silinder^[7]

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*)

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

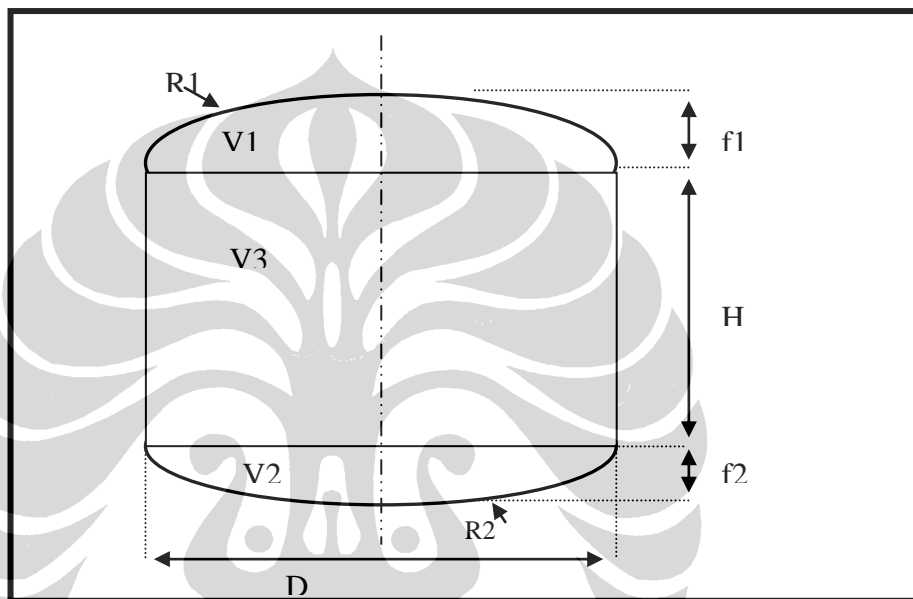
Berdasarkan jumlah volume bahan baku (Q), maka dapat ditentukan volume kerja digester (*working volume digester*) yang merupakan penjumlahan volume ruang penyimpanan (V_{gs}) dan volume ruang fermentasi (V_s).

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

dimana:

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

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



Gambar 2.6. Dimensi Geometrikan Tangki Digester^[7]

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

Tabel 2.4. Dimensi Geometrika Ukuran Tangki Digester Silinder^[7]

ISI	DIMENSI GEOMETRIKAL
$V_{gs} + V_f = 80\% V$	$D = 1.3078 \times V^{1/3}$ $V_1 = V_c + V_{gs} = 0.0827 D^3$ $V_2 = V_s = 0.05011 D^3$ $V_3 = V_f = 0.3142 D^3$ $R_1 = 0.725 D$ $R_2 = 1.0625 D$ $f_1 = D/5$ $f_2 = D/8$

2.5. Teknik Pemurnian Biogas^[15]

Pemurnian biogas adalah pencucian senyawa seperti CO₂, H₂S dan nitrogen (N₂) untuk menambah kandungan energi biometana. Teknologi berikut ini menggambarkan bagaimana CO₂, H₂S bisa dicuci secara efektif.

2.5.1. Penyerapan Kimia dan Penyerapan Fisika (*Chemisorption and Physisorption*)^[15]

Sebagai pengganti air, larutan organik bisa digunakan untuk menyerap CO₂. Larutan ini bentuk dan mereknya berbeda-beda termasuk polyethylene glycol, Selexol®, Genosorb®. H₂S sangat mudah larut dalam Selexol, dan diperlukan proses dengan suhu yang tinggi untuk meregenerasi larutan.

Seperti halnya dengan pencucian air, proses ini memerlukan tekanan yang tinggi untuk adsorpsi CO₂. Pelepasan dilakukan dengan memberi tekanan pada cairan beban CO₂ dan metana dilepaskan. Uap air dari biogas bisa mengkontaminasi zat kimia, mengurangi efisiensinya; zat kimia tersebut selanjutnya harus dipanaskan hingga 105°C untuk memanaskan air. Seperti halnya dengan larutan, mono-etanol amina atau di-metil etanol amina dapat digunakan untuk melarutkan CO₂ melalui reaksi kimia yang dilanjutkan dengan regenerasi dengan menggunakan vakum atau panas (uap). Output CH₄ nya bisa mencapai 99%. Namun produk ini beracun bagi manusia dan lingkungan selain memerlukan penggunaan energi yang signifikan untuk regenerasi dan air dari gas bisa mengkontaminasi unsur kimia, mengurangi efisiensinya.

2.5.2. Penyerapan Dengan Air (*Water Scrubbing*)^[15]

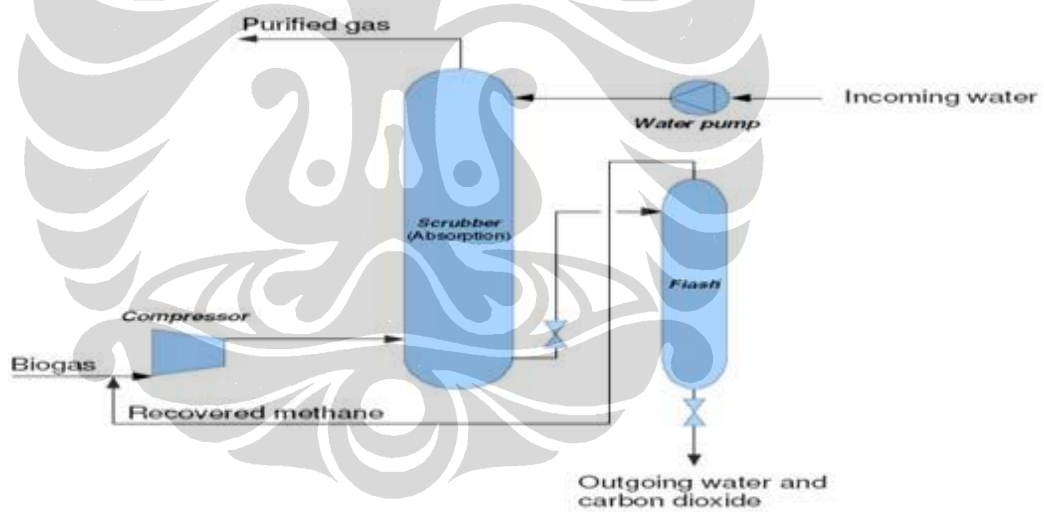
Water scrubbing adalah teknik yang didasarkan pada efek fisik gas yang larut dalam cairan. *Water scrubbing* bisa digunakan untuk menghilangkan CO₂ dan H₂S dari biogas karena unsur-unsur tersebut lebih mudah larut dalam air bila dibandingkan dalam CH₄. Proses penyerapan ini sepenuhnya merupakan proses fisik. Bagian terpenting dari proses tersebut seperti digambarkan pada Gambar. 2.7. Pada *water scrubbing* tekanan tinggi, gas memasuki *scrubber* dengan tekanan tinggi. Tekanan tinggi ini menyebabkan gas semakin tidak larut di dalam air.

Kemudian air akan dipercikkan dari atas kolom sehingga air mengalir ke bawah menuju ke gas.

Pada vessel cepat, tekanan tersebut akan berkurang dan akan dihasilkan CH_4 . Pada ruang tersebut akan dihasilkan air pencuci CO_2 dan H_2S . CO_2 dan H_2S akan dikosongkan oleh udara di dalam vessel ini. Setelah melalui tahap pengeringan, CH_4 murni akan mencapai 98%. Ada dua jenis *water scrubbing*:

Single pass scrubbing

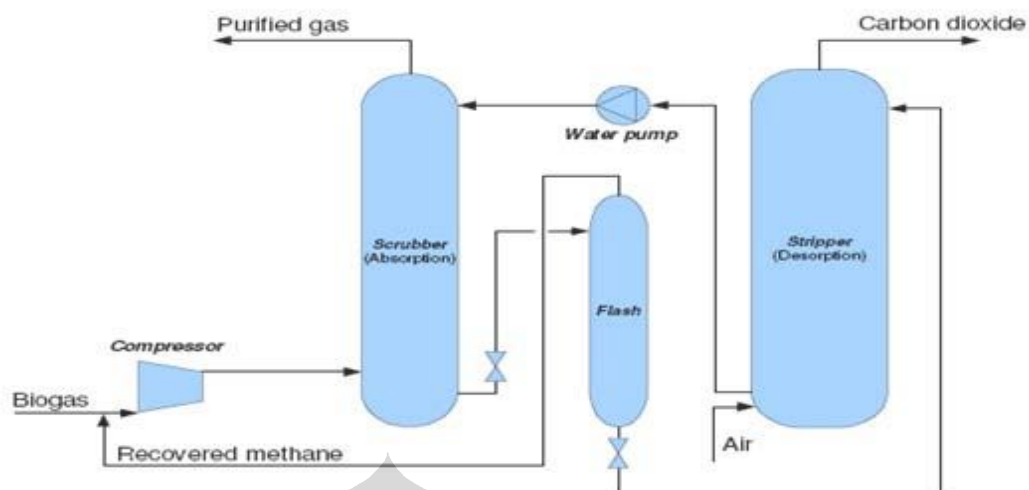
Pada *single pass scrubbing*, air pencuci hanya digunakan sekali. Keuntungan jenis *scrubbing* ini adalah kontaminasi di dalam air tidak akan terjadi seperti adanya sisa-sisa H_2S dan CO_2 . Sehingga jumlah CO_2 dan H_2S akan maksimal. Sedangkan kerugiannya adalah teknik ini membutuhkan air yang sangat banyak. Teknik ini hanya mungkin dilakukan di dekat lokasi pembersihan dengan saluran air bawah tanah dan air tersebut nantinya digunakan dalam teknik ini.



Gambar 2.7. Prinsip Kerja *Single Pass Water Scrubbing*^[15]

Regenerative absorption

Pada penyerapan regenerasi, air pencuci diregenerasi setelah digunakan untuk mencuci biogas. Keuntungan dari teknik ini adalah jumlah air yang dibutuhkan jauh lebih sedikit dibandingkan dengan teknik *single pass scrubbing*.



Gambar 2.8. Prinsip Kerja *Regenerative Absorption Water Scrubbing*^[15]

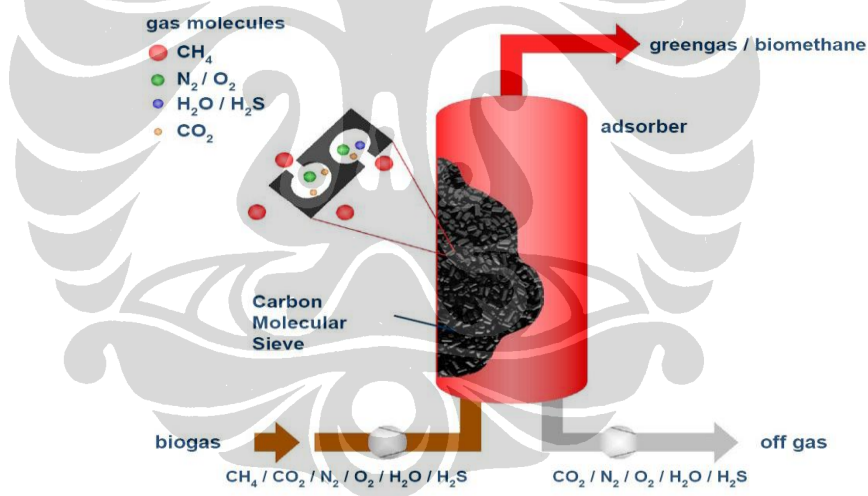
Water scrubbing adalah proses yang sederhana karena hanya membutuhkan air dan kolom penyerapan untuk meningkatkan kualitas (*up grade*) biogas. *Scrubber* juga memiliki lebih banyak keuntungan dibandingkan alat lainnya. *Water scrubbing* dapat digunakan untuk menghilangkan H_2S karena H_2S lebih mudah larut di dalam air bila dibandingkan CO_2 . Air yang keluar dari kolom dengan unsur-unsur yang diserapnya, dapat diregenerasi dan disirkulasi ulang.

2.5.3. Penyerapan Dengan Tekanan (*Pressure Swing Adsorption*)^[15]

Pressure swing adsorption adalah teknik lain yang bisa digunakan untuk memurnikan biogas. PSA adalah teknologi yang digunakan untuk memisahkan unsur-unsur tertentu dari campuran gas di bawah tekanan berdasarkan karakteristik molekul jenis dan afinitas untuk bahan serap (adsorpsi). Bahan adsorpsi menyerap H_2S dengan pasti sehingga akan teracuni oleh H_2S . Karena alasan inilah, tahap penghilangan H_2S seringkali dilibatkan di dalam proses PSA.

Sistem pemurnian terdiri dari empat vessel adsorber yang diisi dengan bahan adsorpsi, seperti terlihat pada Gambar. 2.9. Selama pengoperasian normal, setiap adsorber beroperasi dalam siklus penyerapan secara bergantian, regenerasi dan tekanan build-up. Selama fase adsorpsi, biogas masuk dari bawah ke salah satu adsorber. Ketika melewati vessel adsorber, CO_2 , O_2 dan N_2 akan terserap pada permukaan bahan adsorpsi. Bisa dilihat di Gambar. 2.9.

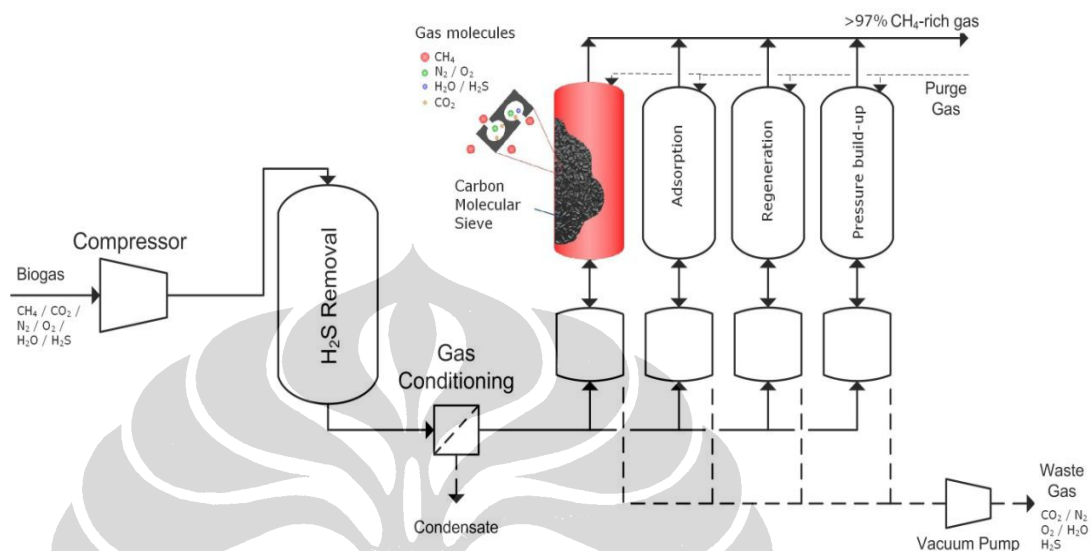
Gas yang meninggalkan bagian atas vessel adsorber mengandung lebih dari 94% CH_4 . Aliran gas yang banyak mengandung metan ini pada dasarnya bebas dari unsur siloxane, organic volatile (VOCs), air dan juga mengandung level CO_2 yang sudah berkurang. Sebelum bahan adsorpsi jenuh oleh unsure-unsur gas teradsorpsi, fase adsorpsi dihentikan dan vessel adsorber lain yang belum diregenerasi dirubah menjadi mode adsorpsi agar tetap terus beroperasi. Regenerasi bahan adsorpsi jenuh dilakukan dengan pemberian tekanan secara bertahap pada vessel adsorber hingga sampai tekanan atmosfer dan akhirnya berada pada kondisi vakum. awalnya, tekanan dikurangi oleh penyeimbang tekanan dengan vessel adsorber regenerasi. Dilanjutkan dengan tahap kedua pemberian tekanan hingga sampai berada pada tekanan atmosfer. Gas yang meninggalkan vessel pada tahap ini mengandung jumlah CH_4 yang signifikan dan akan berputar terus ke inlet gas. Jumlah CH_4 ini akan berada di dalam ruang partikel adsorpsi.



Gambar 2.9. Prinsip dari Pressure Swing Adsorption^[15]

Sebelum fase adsorpsi mulai lagi, vessel adsorpsi akan melalui tahap pemberian tekanan kembali sampai mencapai tekanan adsorpsi akhir. Setelah tekanan keseimbangan dengan adsorber yang telah berada pada mode adsorpsi sebelumnya, akan dicapai tekanan build-up dengan feed gas. Siklus lengkap berlangsung selama 3-5 menit. Keuntungan proses PSA adalah tingginya kandungan CH_4 yaitu lebih dari 97%, dimana tenaga yang lebih sedikit dan

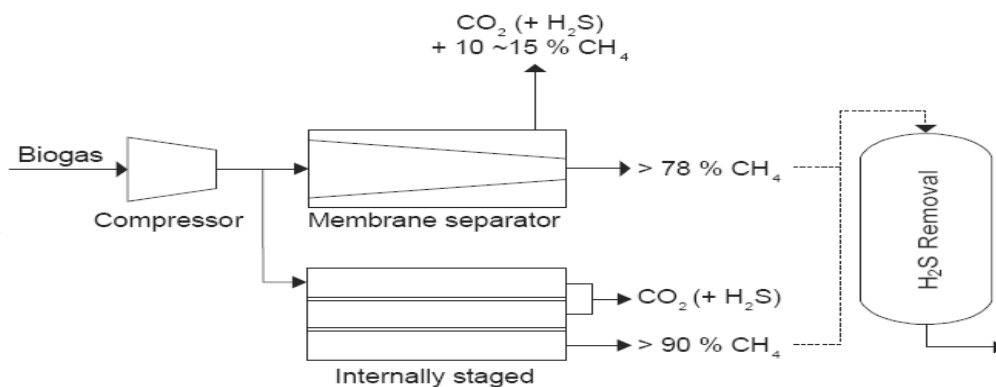
rendahnya tingkat emisi. Aliran buangan plant PSA terdiri dari N_2 , O_2 , H_2O , H_2S dan CO_2 . Keuntungan utamanya adalah adanya tahap penghilangan H_2S . Tahap ini merupakan tahap yang kompleks di dalam proses dan sangat diperlukan.



Gambar 2.10. Prinsip Kerja *Pressure Swing Adsorption*^[15]

2.5.4. Pemisahan Membran (*Membrane Separation*)^[15]

Prinsip pemisahan membran adalah bahwa beberapa unsur gas akan dialirkan melalui membran tipis sementara unsur gas yang lain akan ditahan. Daya tembus adalah fungsi langsung pada daya larut kimia unsur target di dalam membran. Membran padat dapat dibentuk seperti modul fiber berlubang atau bentuk lain yang dapat memberikan permukaan membran yang luas per volume sehingga merupakan unit yang sangat padat (Gambar 2.10). Tekanan pengoperasian yang terjadi biasanya berada pada kisaran 25-40 bar. Prinsip membran ini menyebabkan terjadinya pertukaran antara tingkat kemurnian metan yang tinggi pada gas yang telah di murnikan dengan hasil metan yang yang tinggi pula.

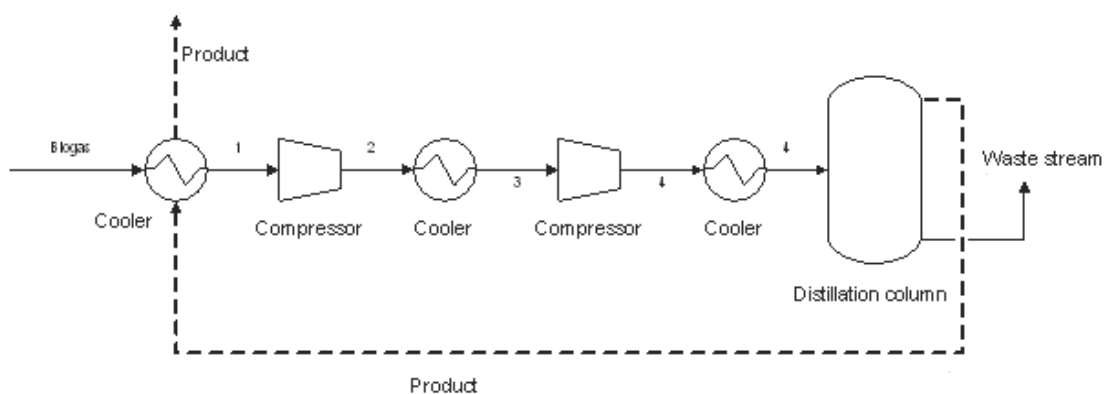


Gambar 2.11. Prinsip Kerja Membrane Separation^[15]

Ada dua teknik pemisahan membran: pemisahan gas bertekanan tinggi dan adsorpsi cairan gas. Proses pemisahan tekanan tinggi akan memisahkan H_2S dan CO_2 dari CH_4 , biasanya pemisahan ini dilakukan dalam tiga tahap dan akan menghasilkan 96% CH_4 murni. Keuntungan pemisahan membran adalah bahwa proses ini padat, ringan dan membutuhkan energi dan perawatan yang rendah serta prosesnya mudah. Kerugian dari pemisahan membran ini adalah CH_4 yang dihasilkan relatif rendah dan biaya membrannya tinggi.

2.5.5. Pemisahan Cryogenic (*Cryogenic Separation*)^[15]

Pemisahan *cryogenic* biogas berdasarkan pada fakta bahwa CO_2 , H_2S dan semua kontaminan biogas dapat dipisahkan dari CH_4 atas dasar bahwa kontaminan tersebut akan mencair pada domain tekanan dengan suhu berbeda. proses pemisahan ini berlangsung pada suhu rendah, mendekati 10°C , dan pada tekanan tinggi, hampir 40 bar. (Gambar 2.12).



Gambar 2.12. Prinsip Kerja Cryogenic Separation^[15]

Biogas mengalir melalui pengubah panas pertama yang akan mendinginkan gas hingga -70°C . Pengubah panas ini akan menggunakan aliran produk sebagai alat pendinginnya, dengan energi yang efisien dan bisa memanaskan biogas upgraded terlebih dahulu sebelum meninggalkan plant. tahap pendinginan pertama dilanjutkan oleh kompresor dan pengubah panas yang akan mendinginkan gas hisap hingga -100°C dan menekannya hingga 40 bar sebelum masuk ke kolom distilasi. akhirnya, kolom distilasi akan memisahkan CH_4 dari kontaminan lain, khususnya H_2S dan CO_2 . Keuntungan dari pemisahan cryogenic ini adalah tingginya kemurnian biogas upgrade (99% CH_4), serta banyaknya biogas yang bisa diproses secara efisien. Keuntungan utama pemisahan cryogenic ini adalah bahwa proses cryogenic membutuhkan penggunaan peralatan proses yang cukup banyak khususnya kompresor, turbin dan pengubah panas. Sehingga dibutuhkan modal dan biaya pengoperasian yang lebih besar dibandingkan proses lain.

2.6. Analisis Kelayakan Finansial

Analisis kelayakan finansial ini digunakan untuk mengetahui apakah pemanfaatan gas biometan sebagai bahan bakar Bis Transjakarta layak secara ekonomi untuk dijalankan.

2.6.1. Analisis *Annual Cost - Benefit*

Dengan menggunakan *metode annual cost - benefit* dapat dievaluasi karakteristik ekonomi pemanfaatan gas biometan sebagai bahan bakar Bis Transjakarta berdasarkan total aliran pendapatan tahunan (*inflow*) dan total aliran biaya pengeluaran tahunan (*outflow*). Selisih besaran antara total aliran pendapatan tahunan dengan total aliran biaya pengeluaran tahunan merupakan suatu keuntungan atau kerugian dari pemanfaatan gas biometan sebagai bahan bakar Bis Transjakarta. Secara sederhana *metode annual cost - benefit* dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_{ba} = R_0 - C_0 - C_f \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}} \quad (2.5)$$

Dengan :

C_{ba}	=	Pendapatan-biaya tahunan	[Rp]
R_o	=	Pendapatan operasional tahunan	[Rp]
C_o	=	Biaya operasional tahunan	[Rp]
C_f	=	Biaya investasi modal pada tahun ke-0	[Rp]
i	=	Tingkat suku bunga	[%]
n	=	Umur ekonomis proyek	[tahun]

2.6.2. Analisis *Capital Budgeting*^[11]

Analisis *capital budgeting* dilakukan dengan membandingkan antara komponen-komponen biaya (*cost*) dengan manfaat (*benefit*) untuk menentukan apakah suatu proyek yang dijalankan tersebut layak atau tidak selama umur proyek. Suatu usaha dapat dinilai layak apabila memberikan keuntungan finansial. Analisis finansial ini dengan melihat kriteria-kriteria investasi yaitu *Pay Back Period* (PBP), *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Net Benefit Cost Ratio* (Net B/C).

2.6.2.1. Waktu Pengembalian (*Pay Back Period, PBP*)^[11]

Waktu pengembalian adalah waktu yang diperlukan (jumlah tahun) untuk mengembalikan modal investasi awal.

$$\text{payback period} = \sum_{k=1}^{\theta} (R_k - E_k) - I \geq 0 \quad (2.6)$$

Dimana :

- θ = waktu pengembalian
- R_k = pendapatan untuk tahun ke-k
- E_k = pengeluaran untuk tahun ke-k termasuk biaya investasi

Besar kecilnya waktu pengembalian memberikan indikasi terhadap resiko dan likuiditas suatu proyek. Makin pendek waktu pengembalian, makin besar likuiditas proyek dan makin kecil resikonya.

2.6.2.2. Nilai Kini Netto (*Net Present Value, NPV*)^[11]

Nilai kini netto menunjukkan keuntungan yang akan diperoleh selama umur investasi, merupakan jumlah nilai penerimaan arus tunai pada waktu sekarang dikurangi dengan biaya yang dikeluarkan selama waktu tertentu.

$$\begin{aligned} NPV &= PW_{\text{pendapatan}} - PW_{\text{pengeluaran}} \\ &= \sum_{k=0}^N R_k \left(\frac{P}{A}, i\%, k \right) - E_k \left(\frac{P}{A}, i\%, k \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dimana:

R_k = pendapatan untuk tahun ke-k

E_k = pengeluaran untuk tahun ke-k termasuk biaya investasi

N = umur proyek

- Jika nilai $NPV > 0$, maka proyek menguntungkan dan layak dilaksanakan
- Jika nilai $NPV = 0$, maka proyek tidak untung dan juga tidak rugi
- Jika nilai $NPV < 0$, maka proyek rugi dan lebih baik untuk tidak dilaksanakan

2.6.2.3. Tingkat Pengembalian Internal (*Internal Rate of Return, IRR*)^[11]

Tingkat pengembalian internal menunjukkan persentase keuntungan yang diperoleh atau investasi bersih dari suatu proyek, atau tingkat diskonto yang dapat membuat nilai kini netto (NPV) sama dengan nol.

$$\begin{aligned} NPV = 0 &= PW_{\text{pendapatan}} - PW_{\text{pengeluaran}} \\ &= \sum_{k=0}^N R_k \left(\frac{P}{A}, i\%, k \right) - E_k \left(\frac{P}{A}, i\%, k \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

- Jika nilai $IRR > MARR$, maka proyek layak untuk dilaksanakan
- Jika nilai $IRR < MARR$, proyek tidak layak untuk dilaksanakan

2.6.3. Analisis Sensitivitas

Suatu proyek pada dasarnya menghadapi ketidakpastian karena dipengaruhi perubahan-perubahan baik dari sisi penerimaan atau pengeluaran yang akhirnya akan mempengaruhi tingkat kelayakan proyek. Analisis sensitivitas bertujuan untuk melihat apa yang akan terjadi dengan hasil analisis proyek jika ada suatu kesalahan atau perubahan-perubahan dalam dasar-dasar perhitungan biaya atau manfaat.

Pengujian dengan analisis sensitivitas ini dilakukan sampai dicapai tingkat minimum dimana proyek dapat dilaksanakan dengan menentukan berapa besarnya proporsi manfaat yang akan turun akibat manfaat bersih sekarang menjadi nol ($NPV=0$). NPV sama dengan nol akan membuat IRR sama dengan tingkat suku bunga. Analisis sensitivitas pada penelitian ini dilakukan pada IRR dan Payback Period terhadap perubahan harga jual bahan bakar gas.

