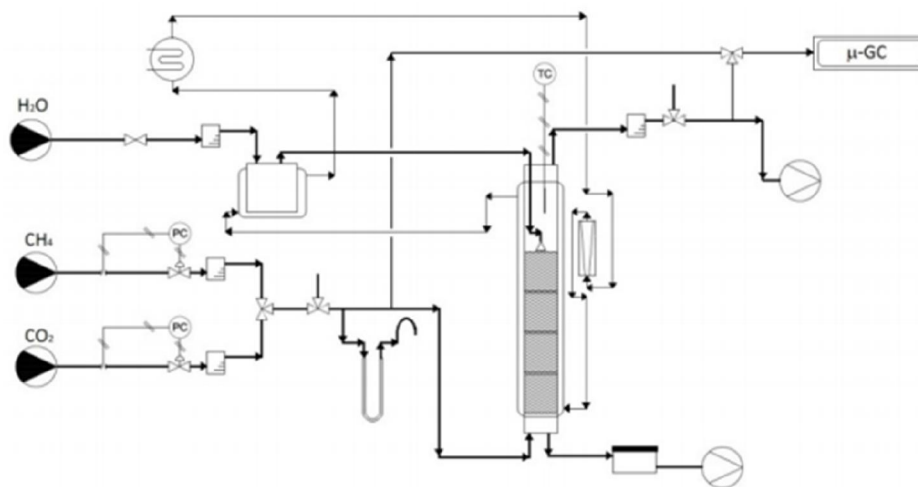


BAB II

DASAR TEORI

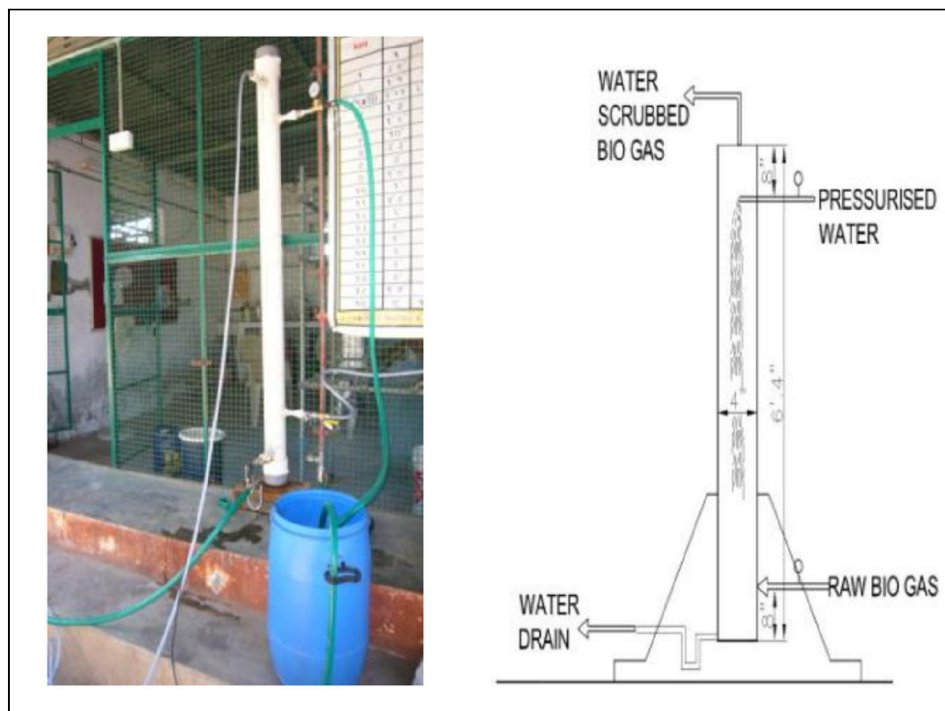
2.1 Tinjauan Pustaka

Pemurnian biogas dengan metode *water-washing* dapat optimal dengan cara menurunkan suhu air dan meningkatkan tekanan penyerapan (tekanan biogas atau debit air) bahwa gas CO₂ akan lebih larut dalam air daripada gas CH₄ (Peterson dkk., 2009). Usaha-usaha yang telah dilakukan dengan metode *water-washing* dengan cara menurunkan suhu pada tekanan atmosfer dapat dilihat dari Gambar 2.1. Hasilnya dapat membuang 70% gas CO₂ oleh air dengan kolom absorpsi material *glass* berdiameter 43 mm dan tinggi 390 mm (Pirola dkk., 2015). Mula-mula temperatur air diturunkan pada variasi temperatur 6,5-20⁰C dengan variasi debit 0,5 sampai 5 liter/jam. Kemudian biogas dimasukkan kedalam kolom penyerapan pada tekanan atmosfer. Biogas yang digunakan berasal dari campuran gas CH₄ dan gas CO₂ dengan fraksi molar CH₄ sebesar 0,6. Penyerapan terjadi ketika air dijatuhkan dari atas kolom absorpsi sementara biogas melalui bawah kolom sehingga air hasil penyerapan gas CO₂ dibuang karena suplai air pada penelitian ini tidak disirkulasikan.



Gambar 2.1 Metode *water-washing* dengan cara menurunkan suhu air (Pirola dkk., 2015)

Peningkatan tekanan penyerapan CO_2 dengan cara meningkatkan debit aliran air sampai 1100 liter/jam telah dilakukan oleh Shah dkk. (2015) dengan *head* pompa sebesar 10 feet pada kolom absorpsi berdiameter 4 inci (101,6 mm) dan tinggi 5 feet (1,5 m). Pada Gambar 2.2, air dipompa ke suatu *nozzle* (8 inci dari atas kolom) dan dimasukkan ke dalam kolom absorpsi untuk menyerap biogas (dengan 61,22% CH_4 dan 32,01% CO_2) yang dialirkan melalui katup (8 inci dari bawah kolom) sehingga terjadi absorpsi antara air dengan biogas. Selanjutnya air hasil penyerapan berupa H_2CO_3 kemudian dibuang melalui sebuah belokan “U” yang dipasang untuk mencegah terbuangnya biogas. Hasilnya, terjadi peningkatan kadar CH_4 menjadi 89,54% dengan sisa CO_2 menjadi 5,02%.



Gambar 2.2 Metode *water-washing* dengan cara menaikkan debit air (Shah dkk., 2015)

Selain itu, penyerapan CO₂ dengan cara menaikkan tekanan biogas telah dicoba oleh Xiao dkk. (2014). Pengujian dilakukan pada sebuah tabung *stainless-steel* berdiameter 50 mm dan tinggi 0,9 m pada variasi tekanan penyerapan 0,8-1,2 MPa (8-12 bar) dan hasilnya dapat menghilangkan 94,2% gas CO₂ pada 1,2 MPa dengan rasio debit air dengan CO₂ (rasio cair/gas) sebesar 0,5. Penyerapan terjadi ketika air dingin (17-20⁰C) tersirkulasi dalam sistem dan menyerap CO₂ di *absorption tower* pada arah yang berlawanan dan dibuang pada *desorption tower* sehingga air kembali murni. Dengan demikian, sistem ini membutuhkan banyak daya eksternal yang dibutuhkan seperti pada kompresor, *heat exchanger*, *blower*, dan pompa seperti pada Gambar 2.3.

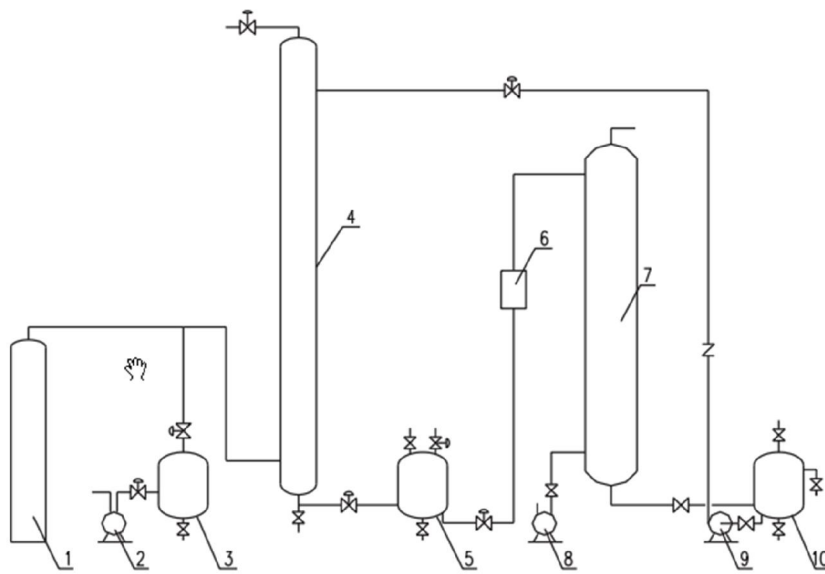


Fig. 1. Experimental facility for CO₂ absorption.

1—CO₂ cylinder; 2—air compressor; 3—gas buffer tank; 4—absorption tower; 5—rich solution tank; 6—heat exchanger; 7—desorption tower; 8—air blower; 9—water pump; 10—lean solution tank.

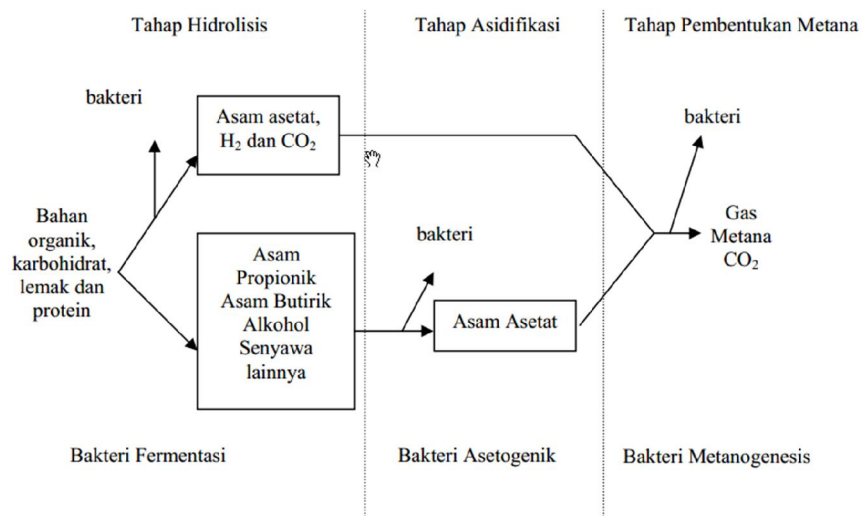
Gambar 2.3 Metode *water-washing* dengan cara menaikkan tekanan biogas dan menurunkan suhu air (Xiao dkk., 2014)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses fermentasi bahan-bahan organik oleh bakteri *anaerob* yang sebagian besar terdiri dari gas CH_4 dan CO_2 yang telah mengalami beberapa tahap seperti tahap hidrolisis, asidifikasi (pengasaman), dan metanogenesis (Amaru, 2004).

Tahap Hidrolisis adalah tahap penguraian bahan organik yang masih kompleks (polimer) menjadi lebih sederhana (monomer) oleh bakteri fermentasi. Bahan organik sederhana tadi selanjutnya dikonsumsi oleh bakteri asetogenik menjadi asam asetat, propionat, format, laktat, alkohol, dan sedikit butirrat, hidrogen, ammonia, dan CO_2 pada tahap asidifikasi. Selanjutnya, pada tahap metanogenesis, asam asetat dan CO_2 diubah menjadi CH_4 oleh bakteri metanogenesis. Tahap hidrolisis pada bahan baku kotoran sapi murni berlangsung pada hari ke-1 sampai hari ke-7. Sementara, biogas akan muncul pada hari ke-10 sampai ke-30 (Susilo, 2010). Tahapan produksi biogas dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Tahapan Produksi Biogas (Amaru, 2004).

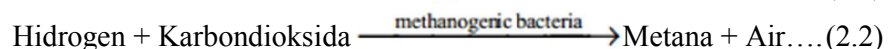
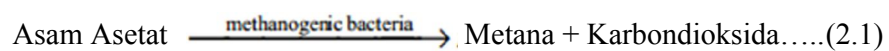
Biogas yang dihasilkan dari tahap-tahap tersebut mayoritas masih mengandung CH_4 , CO_2 , H_2S , uap air, dan gas-gas lain sehingga gas CH_4 perlu dipisahkan. Sementara, jika langsung digunakan, energi yang dihasilkan tidak maksimal karena keberadaan gas CO_2 yang bersifat *unflammable* menghalangi CH_4 terbakar dan akhirnya terbuang sia-sia.

2.2.2 Gas Metana (CH_4)


Gas CH_4 secara atomik terdiri dari satu atom karbon dan empat atom hidrogen yang tergolong hidrokarbon tingkat terendah. Gas ini memiliki nilai kalor lebih tinggi sebesar 55.5 MJ/kg daripada produk bahan bakar yang saat ini digunakan seperti gas LPG (*Liquified Petroleum Gas*) yang berisi propana (C_3H_8) sebesar 50.3 MJ/kg atau *gasoline* ($\text{C}_n\text{H}_{1.87.n}$) sebesar 47,3 MJ/kg (Demirel, 2012). Hal ini membuat gas CH_4 lebih ekonomis karena menyimpan energi yang besar per satuan massa dan diproduksi dari kotoran.

Gas CH_4 alaminya sering terbentuk pada daerah-daerah lumpur dan lembap yang terisolasi dari kontak udara seperti daerah rawa atau selokan yang akan menyumbang besar pada komposisi udara di atmosfer. Dari Tabel 2.1, densitas metana sebesar 0,6 kg/m^3 lebih ringan daripada udara atmosfer 1,3 kg/m^3 sehingga pada atmosfer bagian atas akan lebih kaya gas metana dibandingkan dengan udara permukaan. Hal ini akan menyebabkan dampak negatif pada lingkungan yaitu peresapan energi termal dari sinar matahari (O'Neil, 2013).

Sementara, produksi gas CH_4 dalam biogas dapat diperoleh dari proses metanogenesis oleh bakteri dengan cara mengubah asam asetat menjadi CH_4 dan CO_2 atau dari gas CO_2 dengan bantuan H_2 menjadi CH_4 dan air. 70% gas CH_4 dalam biogas berasal dari asam asetat dan sisanya 30% berasal dari CO_2 dan H_2 . Produksi CH_4 oleh bakteri tersebut akan mencapai nilai maksimal pada hari ke-30 dan terjadi penurunan pada hari berikutnya (Al Seadi dkk., 2008).



Tabel 2.1 Sifat-sifat CH₄ (O'Neil, 2013).

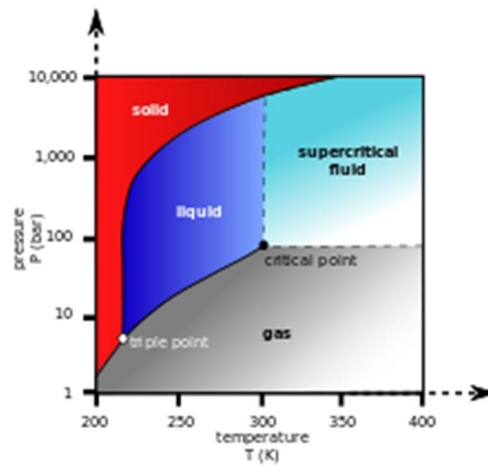
Rumus Kimia	CH ₄
Nama Lain	<i>Natural Gas, Carbontetrahydrida</i>
<i>Apperance</i>	Tidak berwarna dan berbau
Densitas	0,656 kg/m ³ (gas, 25 ⁰ C, 1 atm) 0,716 kg/m ³ (gas, 0 ⁰ C, 1 atm) 0,42262 kg/m ³ (liquid, -162 ⁰ C)
Sumber Bahaya	
Titik Nyala	-188 °C (-306,4 ⁰ F; 85,1 K)
Titik Lebur	-182,5 °C; -296,4 ⁰ F; 90,7 K
Titik Didih	-161,49 °C; -258,68 ⁰ F; 111,66 K
Sifat Kelarutan	Larut dalam air (22,7 mg/L), <i>ethanol</i> , <i>diethyl ether</i> , <i>benzene</i> , <i>toluene</i> , <i>methanol</i> , <i>acetone</i> .
Kapasitas Termal Spesifik	2,191 J/g.K

2.2.3 Gas Karbondioksida (CO₂).

Gas CO₂ adalah gas alam yang sangat akrab dengan manusia, karena setiap siklus pernapasan manusia menghasilkan gas karbondioksida yang selanjutnya akan diserap oleh tanaman melalui proses fotosintesis oleh sinar matahari. Gas CO₂ dalam biogas berasal dari tahap hidrolisis dan metanogenesis. Selain mengubah bahan organik kompleks menjadi sederhana pada tahap asidifikasi, bakteri fermentasi juga mengubahnya menjadi gas H₂ dan CO₂. Selanjutnya pada tahap metanogenesis, gas CO₂ akan terbentuk bersama CH₄ dalam penguraian asam asetat oleh bakteri metanogenesis

Gas CO₂ uniknya memiliki *triple point* (dapat dilihat pada Gambar 2.5), dimana perubahan wujud dapat langsung berubah dari gas ke padatan (1 atm, -

78,5⁰C) karena karbondioksida cair dapat diperoleh jika tekanannya diatas tekanan atmosfer (5,1 atm, -56,6⁰C) sehingga padatan CO₂ dapat ditemukan didaerah yang sangat dingin seperti daerah kutub.




Gambar 2.5 Diagram Fasa Karbondioksida (O'Neil, 2013).

Triple point pada CO₂ umumnya dimanfaatkan untuk tujuan pendinginan, baik pada keperluan rumah tangga maupun keperluan industri. Gas CO₂ dirubah fasanya menjadi padatan *dry ice* (es kering) untuk dijual di pasaran sehingga dapat mendinginkan makanan secara *portable*. Padatan *dry ice* dapat diperoleh dengan cara menurunkan suhu CO₂ sampai -78,5⁰C sehingga gas CO₂ dapat langsung tersublimasi menjadi padatan pada tekanan atmosfer. Sedangkan perubahan fasa menjadi cairan atau sebaliknya dimanfaatkan untuk proses refrigerasi sebagai R744.

Selain dimanfaatkan dalam hal pendinginan, gas CO₂ yang bersifat *unflammable* ini dimanfaatkan untuk memadamkan sumber api. CO₂ dimampatkan dan dimasukkan kedalam tabung alat pemadam kebakaran (APAR). Penggunaan APAR CO₂ tidak akan menimbulkan sisa cairan yang ditimbulkan oleh APAR berbasis air.

Tabel 2.2 Sifat-sifat CO₂ (O'Neil, 2013)

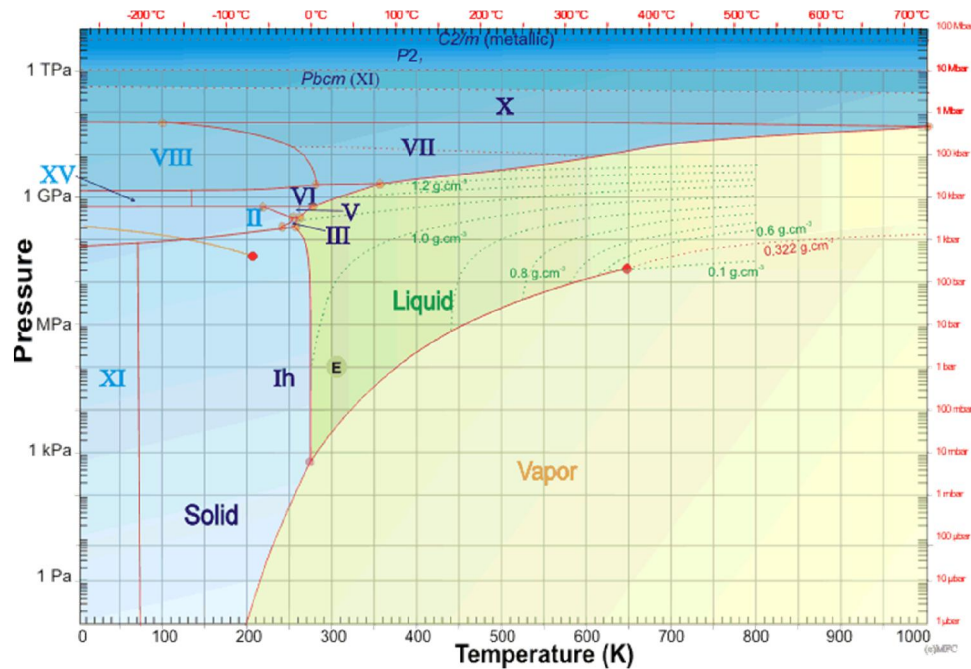
Rumus Kimia	CO ₂
Nama Lain	<i>Dry Ice, R744.</i>
<i>Apperance</i>	Tidak berwarna dan berbau
Densitas	1562 kg/m ³ (padat @1 atm dan -78,5°C) 1101 kg/m ³ (cair @ -37°C) 1,977 kg/m ³ (gas @1 atm dan 0°C)
Titik Lebur	-56,6°C; -69,8°F; 216,6 K (<i>triple point @ 5,1 atm</i>)
Sublimasi	-78,5°C; -109,2 °F; 194,7 K (1 atm)
Sifat Kelarutan	Larut dalam air (1,45 g/L @25°C (77°F), 1 atm)
Kapasitas Termal Spesifik	0,839 J/g.K
Sumber Bahaya	

2.2.4 Air

Air merupakan senyawa yang sangat penting karena setiap makhluk hidup selalu membutuhkannya dalam kebutuhan sehari-hari. Air di bumi dapat ditemukandi laut, danau, sungai, air tanah (sumur), dan sebagainya yang setiap hari oleh panas matahari dipindahkan ke tempat lain pada siklus penguapan air. Air kemudian menguap dan berkumpul oleh angin untuk menambah densitas atau meningkatkan massa dalam suatu ruang/volume sehingga air dapat kembali turun untuk menetralsir polutan atmosfer seperti CO₂.

Air dibentuk oleh dua buah hidrogen dan satu buah oksigen yang memiliki densitas yang lebih besar (1000 kg/m³) daripada densitas CH₄ dan CO₂. Hal ini dikarenakan densitas cairan jauh lebih besar dibandingkan densitas gas. Air memilik titik didih sebesar 100°C dan titik beku sebesar 0°C pada tekanan

atmosfer. Tetapi pada kondisi tertentu seperti pada Gambar 2.6, air dapat mendidih pada suhu dibawah suhu titik didih yaitu pada tekanan rendah ($P < P_{atm}$).



Gambar 2.6 Diagram Fase Air (Chaplin, 2017)

2.2.5 Metode *Water-washing*

Metode *water-washing* secara harfiah berarti pencucian oleh air, maka air digunakan untuk mencuci biogas dari pengotor CO_2 . Pencucian secara ideal yaitu penyerapan CO_2 pada kolom *absorber* dan membuangnya pada kolom *desorber*, tetapi dalam prosesnya seringkali tidak maksimal karena residu CO_2 dalam air yang sukar dilepas dan dibuang dari sistem. Sistem metode *water-washing* ini mirip sekali dengan sistem *pressure swing adsorption* (PSA) dimana terdapat kolom *absorber-desorber*, namun *water-washing* memakai air sedangkan PSA menggunakan *activated carbon* sebagai media penyerap.

Proses penyerapan CO_2 sangat tergantung pada suhu dan tekanan penyerapannya. Jika suhu dinaikan, maka air lebih cenderung menguap dan penyerapan gas CO_2 dalam air tidak maksimal. Penyerapan akan meningkat jika suhu air diturunkan ke suhu diantara titik beku air (0°C) dan suhu kamar ($\sim 27^\circ\text{C}$) agar air dipertahankan pada kondisi cairan dan tekanan penyerapannya dinaikan

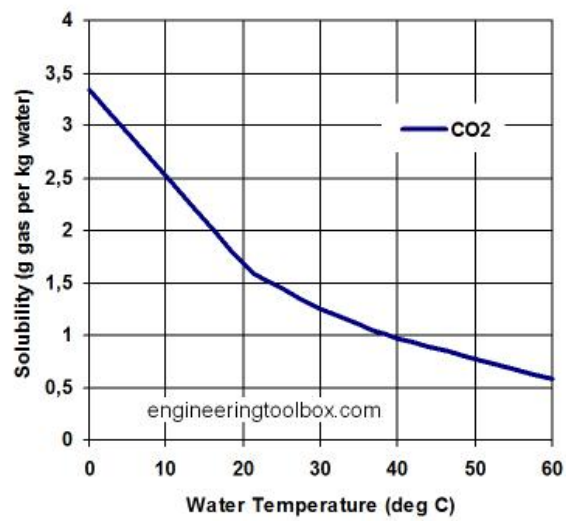
baik dengan cara menaikkan tekanan gas CO₂ maupun menaikkan debit aliran air untuk menambah kontak fisik. Penyerapan yang terjadi yaitu gas CO₂ membentuk gelembung-gelembung yang terperangkap dalam air. Gelembung-gelembung ini harus dibuang ke udara pada sebuah kolom desorpsi agar air dapat digunakan kembali.

Hasil penyerapan CO₂ yaitu berupa selanjutnya harus dibuang dari air. Salah satu cara untuk melepaskannya yaitu dengan cara menaikkan suhu dan menurunkan tekanannya. Kondisi yang optimal yaitu diatas suhu kamar dan di bawah tekanan atmosfer ($T > T_{\text{kamar}}$, $P < P_{\text{atm}}$) sehingga gas CO₂ dan air dapat kembali ke kondisi semula yang terpisah.

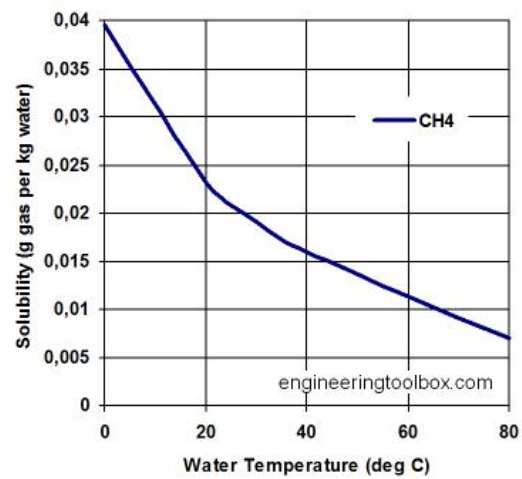
Berikut faktor-faktor yang mempengaruhi penyerapan CO₂ dalam air :

a. Suhu Pelarut

Proses reaksi kimia secara umum adalah penggabungan antara dua atau lebih senyawa dan membentuk senyawa baru yang membutuhkan energi aktivasi berupa energi termal tambahan untuk memecah molekul yang saling berikatan. Tetapi dalam kelarutan gas pada cairan, energi termal di dalam pelarut harus dibuang untuk mempertahankan molekulnya sehingga gas dapat terperangkap di dalamnya. Terperangkapnya gas didalam cairan dikarenakan strukturnya yang dingin lebih dapat menyerap gas karena semakin dingin suatu cairan, maka semakin kuat ikatan antar molekulnya dan pula sebaliknya semakin panas suatu cairan, maka semakin lemah ikatan molekulnya. Ikatan molekul ini digunakan untuk menyaring gas (cairan berikatan dengan gas secara fisik). Pada suhu dibawah suhu ruangan kelarutan CO₂ (Gambar 2.7) dan CH₄ (Gambar 2.8) dalam air lebih besar kadarnya.



Gambar 2.7 Pengaruh Suhu Air terhadap Kelarutan gas CO_2 dalam air pada tekanan atmosfer (Anonim, 2016)



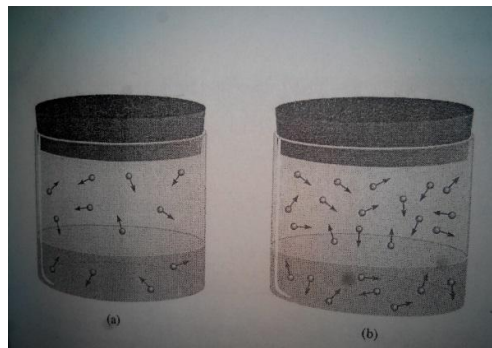
Gambar 2.8 Pengaruh Suhu Air terhadap Kelarutan gas CH_4 dalam air pada tekanan atmosfer (Anonim, 2016)

b. Tekanan Zat Terlarut

Seperti halnya pengaruh suhu pelarut terhadap penyerapan CO₂, tekanan pun berpengaruh besar dalam penyerapan CO₂. Semakin tinggi tekanan zat terlarut, maka semakin besar kelarutan zat terlarut dalam sebuah pelarut (Gambar 2.9). Hal ini berlaku hanya pada kelarutan gas pada sebuah cairan. Hubungan antara kelarutan dan tekanan gas pada sebuah cairan ditunjukkan oleh *hukum Henry* bahwa *kelarutan gas dalam cairan berbanding lurus dengan tekanan gas diatas larutannya* (Chang, 2003).

$$c \propto P$$

$$c = k \cdot P \dots \dots \dots (2.5)$$



Gambar 2.9 Gambaran Molekul-molekul Gas, bila tekanannya dinaikan dari (a) ke (b), kelarutan gas meningkat sesuai dengan Persamaan (2.5) (Chang, 2003)

Dimana c adalah kelarutan gas pada cairan (gr gas.atm/gr cairan), P ialah tekanan gas diatas larutan (atm), dan k adalah konstanta yang hanya bergantung pada suhu dengan satuan gr gas/gr cairan.

2.2.6 Persamaan Gas Ideal

Persamaan Gas Ideal adalah gabungan dari tiga hukum gas yaitu hukum *hukum Boyle*, *Charles*, dan *Avogadro*. Tiga hukum ini sama-sama membahas tentang pengaruh suhu (T), tekanan (P), dan mol (n) terhadap volume yang akan terjadi pada suatu gas.

$$\text{Hukum Boyle} \quad : \quad V = a/P \quad (\text{pada } T \text{ dan } n \text{ tetap}) \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\text{Hukum Charles} \quad : \quad V = b.T \quad (\text{pada } P \text{ dan } n \text{ tetap}) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$\text{Hukum Avogadro} \quad : \quad V = c.n \quad (\text{pada } T \text{ dan } P \text{ tetap}) \dots \dots \dots (2.8)$$

Hal ini membuat persamaan baru yakni *persamaan gas ideal* (Takeuchi, 2006).

$$P \cdot V = n \cdot R_u \cdot T \dots \dots \dots (2.9)$$

$$P \cdot V = \frac{m}{m_r} \cdot R_u \cdot T \dots \dots \dots (2.10)$$

Keterangan : P = Tekanan (Pa)

V = Volume (m³)

n = Jumlah Mol (mol)

m = Massa (g)

m_r = Massa Relatif (g/mol)

R_u = Konstanta Gas Universal (8,314 $\frac{J}{mol \cdot K}$)

T = Suhu (K)

2.2.7 Tekanan Hidrostatik Fluida

Tekanan hidrostatik fluida adalah tekanan yang diakibatkan oleh gaya suatu fluida terhadap luas permukaan tekan pada kedalaman/ketinggian tertentu. Hal ini dikarenakan gravitasi yang menarik suatu fluida ke pusat bumi. Besarnya tekanan yang terjadi pada suatu luas permukaan tergantung dari besar densitas fluida, gravitasi, dan ketinggian/kedalaman suatu fluida. Pada permukaan laut, besarnya tekanan fluida yang menekan luasan permukaan tekan ialah sebesar tekanan atmosfer (lihat Gambar 2.10). Tekanan hidrostatik fluida dapat dirumuskan pada persamaan 2.11 (White, 1998).

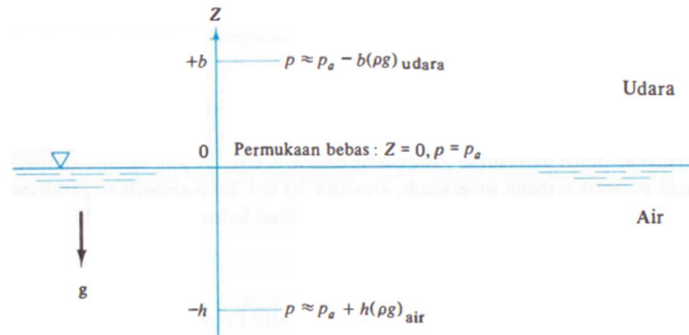
$$P = \rho \cdot g \cdot H \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan : P = Tekanan (Pa)

ρ = Densitas (kg/m³)

g = Gravitasi (9,81 m/s²)

H = Ketinggian/kedalaman (m)



Gambar 2.10 Distribusi tekanan hidrostatis di lautan dan atmosfer (White, 1998).

a) Tekanan Atmosfer

Tekanan Atmosfer adalah tekanan alami atmosfer bumi yang terjadi pada benda dibawahnya. Tekanan ini sebesar 1 atm pada permukaan air laut.

$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$$

b) Tekanan *Gauge*

Tekanan *Gauge* adalah tekanan yang terjadi pada sebuah ruang/bejana yang tidak berhubungan dengan udara atmosfer (*close system*). Tekanan ini dapat lebih besar dari tekanan atmosfer (*compressed*) atau lebih kecil (*vacuum*).

$$P_{\text{comp.}} > P_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{vaccum.}} < P_{\text{atm}}$$

c) Tekanan *Absolute*

Tekanan *Absolute* adalah tekanan mutlak yang menggabungkan tekanan *atmosfer* dengan tekanan *gauge* karena pada sebuah bejana tekan sebenarnya mengalami tekanan *gauge* (*compress/vacuum*) di dalam dan tekanan *atmosfer* di luar bejana (Cengel, 2005).

$$P_{\text{abs.}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{gauge}} \dots \dots \dots (2.12)$$

