

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biogas

Biogas merupakan salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Biogas adalah gas mudah terbakar dan tidak berwarna yang didapat dari proses anaerobik digesti dengan bahan dasar limbah organik (Abubakar, 1990). Biogas memiliki nilai panas pembakaran antara 4800-6200 kkal/m³, dan memiliki rapat jenis 20% lebih ringan dibandingkan dengan udara (Mara, 2012). Sedangkan nilai pembakaran gas metana murni dapat mencapai 8900 kkal/m³. Biogas sering digunakan untuk memasak, penerangan atau sebagai sumber listrik (Bond, dan Templeton). Namun, suatu pabrik tertentu dapat menggunakan biogas sebagai bahan bakar (Bond, dan Templeton).

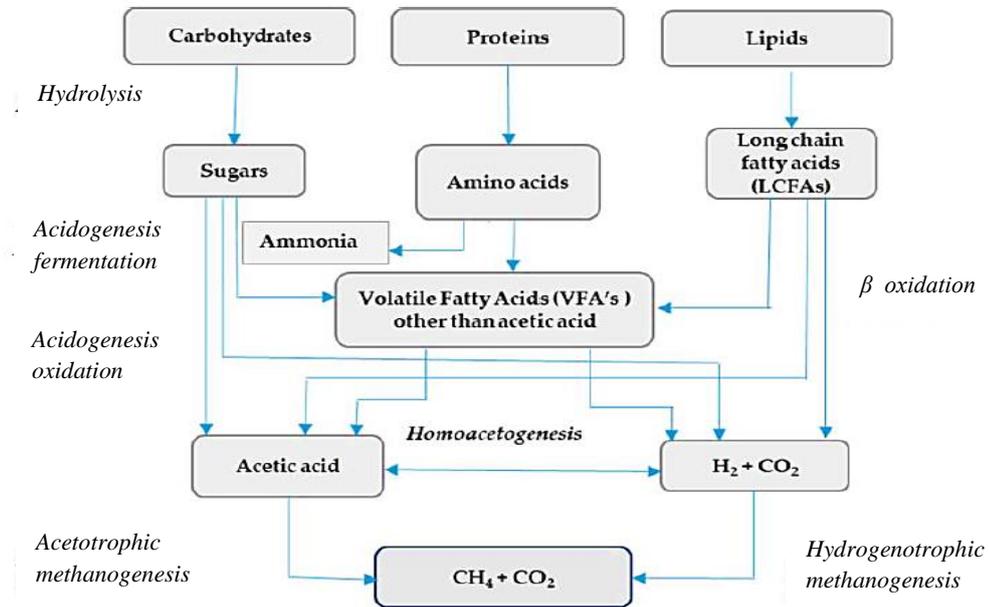
Tabel 2.1 Komposisi biogas dalam persentase

Komponen	Persen
Karbon dioksida (CO ₂)	30,7
Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	2,1
Carbon monoksida (CO)	9,9
Metana dan uap air	52,3

Sumber: (Ezekoye, dan Okeke, 2006)

Biogas dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik. Fermentasi anaerobik merupakan proses perombakan bahan organik dalam suatu tempat tertutup yang dilakukan oleh bakteri fakultatif maupun obligat pada suhu 35-55°C (Mahajoeno, dkk., 2008). Dalam proses fermentasi anaerobik, karbon (C) dibutuhkan oleh bakteri anaerobik sebagai sumber utama energi untuk menghasilkan asam lemak volatil, gas metana (CH₄) dan CO₂ (Saputra, dkk., 2010). Selain karbon, bakteri anaerobik juga membutuhkan nitrogen (N) untuk kebutuhan hidup dan pembelahan sel (Saputra, dkk., 2010).

Secara singkat, tahap-tahap pembentukan biogas dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



Sumber: (Kalsum, dkk., 2020)

Gambar 2.1 Tahap fermentasi anaerob untuk produksi biometana

Menurut (Raja dan Wazir, 2017), terdapat empat tahap pembentukan biogas untuk menghasilkan metana, yaitu:

a. Hidrolisis

Hidrolisis adalah tahap dimana protein polimer organik, lemak dan karbohidrat terpecah menjadi molekul kecil seperti asam amino, asam lemak, dan gula.

b. Asidogenesis : tahap dimana terjadi proses fermentasi oleh bakteri yang mengasamkan lingkungan di dalam biodigester yang menghasilkan ammonia, H₂, CO₂, H₂S, asam lemak volatile, dan asam organik.

c. Asetogenesis : tahap dimana asam asetat derivatif dihasilkan dari karbon, dan sumber energi oleh bakteri asetogen yang mengkatabolisme produk asidogenesis menjadi asam asetat, CO₂, dan H₂.

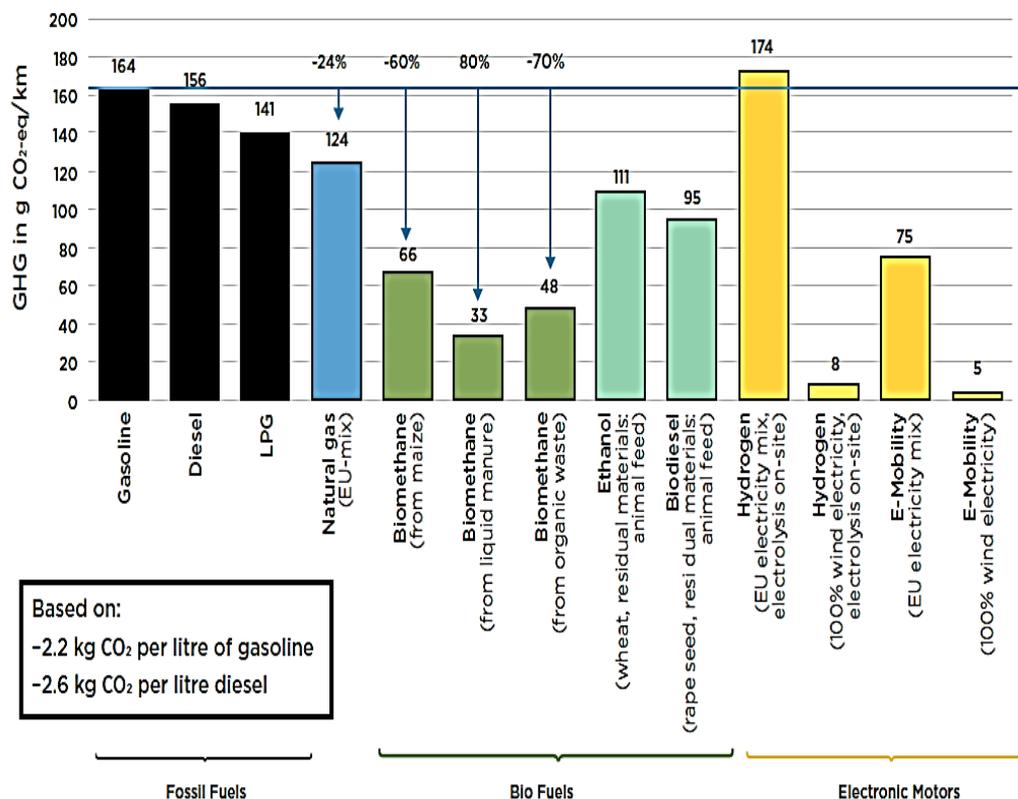
d. Methanogenesis : tahap ini merupakan tahap terakhir dalam fermentasi anaerobik, dimana metana dihasilkan. Ada dua persamaan yang terjadi dengan menggunakan asam asetat dan karbon dioksida:



CO₂ dapat dikonversi menjadi metana dan air pada reaksi (i), mekanisme utama untuk menghasilkan metana terjadi pada tahap methanogenesis yang dihasilkan dari asam asetat. Tahap ini menghasilkan dua produk utama dalam fermentasi anaerobik biogas, yaitu metana, dan karbondioksida.

Biasanya digester anaerobik didesain untuk beroperasi pada 20-40°C (mesofilik), atau di atas 40°C (termofilik) (Bond, dan Templeton). *Slurry* dapat digunakan sebagai pupuk yang dihasilkan dari proses digesti biomassa cair secara anaerobik (Bond, dan Templeton).

Peningkatan kualitas biogas dilakukan dengan menurunkan kadar karbon dioksida, hidrogen sulfida, dan air dari biogas yang dihasilkan untuk mendapatkan kandungan metana dengan kemurnian lebih dari 98%. Biogas dengan kemurnian metana lebih dari 98% dapat disebut juga dengan bio-metana yang setara dengan *compressed natural gas* (CNG) (Singhal, dkk., 2017).



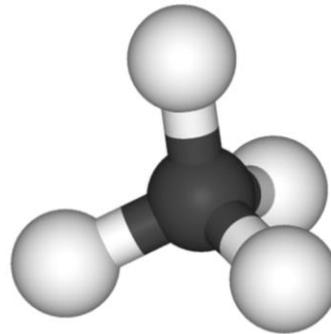
Sumber: International Renewable Energy Agency, 2018

Gambar 2.2 Perbandingan *Greenhouse Gas Emission* dari hasil pembakaran pada mobil yang menggunakan bahan bakar berbeda

Diagram diatas menunjukkan bahwa biometana menawarkan pengurangan *Greenhouse Gas Emission* yang signifikan (IRENA, 2018). Grafik diatas juga menunjukkan bahwa biometan menghasilkan CO₂ yang lebih rendah jika dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

2.2 Metana (CH₄)

Metana adalah alkana paling sederhana dan terdiri dari satu atom karbon, dan empat atom hidrogen yang merupakan molekul organik yang paling banyak di bumi (SGC, 2012). Struktur molekul metana dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut:



Sumber: SGC, 2012

Gambar 2.3 Rumus Bangun Metana

Sifat-sifat fisik metana dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Sifat-sifat Fisik Metana

Sifat	Satuan	Nilai
Berat Molekul	Kg/kmol	16,4
<i>Specific gravity</i>		0,415-164
Melting point	°C	-182,6
Densitas pada 90,69K	mol/l	28,180
Densitas pada 190,56K	mol/l	10,0820
Autoignition	°C	536,85
Titik nyala	°C	-187,15
Viskositas	μPa.s	204,52
<i>Flammable Range</i>	%	4,4-16,5
Titik Didih	°C	-161,4

Sumber: (Maloney, 2008)

Sifat-sifat kimia metana :

- Mudah terbakar (Virginia University, 2018)
- Mudah meledak pada konsentrasi dengan udara 5-15% (Virginia University, 2018)

- Nilai kalor metana murni berkisar 1000 BTU/ft³ (Virginia University, 2018)
- Bereaksi dengan oksigen dalam reaksi pembakaran (Russell, 2012):
$$\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$$
- Kelarutan dalam air pada suhu 20°C = 0,4 cc (Maloney, 2008)
- Daya larut dalam alkohol pada suhu 20°C = 47 cc (Maloney, 2008)
- Daya larut dalam ether pada suhu 10°C = 104 cc (Maloney, 2008)

Metana murni merupakan gas yang terbentuk dari satu atom karbon dan empat atom hidrogen yang tidak berbau. Gas metana bersifat mudah terbakar, dan lebih ringan dari udara (Virginia University, 2018). Metana digunakan dalam pembuatan bahan kimia lain dan sebagai bahan bakar, gas alam (PubChem, 2020).

Metana terbentuk oleh bakteri metana atau disebut juga dengan bakteri anaerobik melalui proses fermentasi bahan organik (Badrussalam, 2008). Metana merupakan salah satu gas rumah kaca yang memberikan dampak 21 kali lebih berbahaya dibandingkan dengan CO₂ (Gustiar, dkk., 2014). Laporan Livestock's long shadow, FAO tahun 2007 menyatakan bahwa metana dapat dihasilkan dari hewan ruminansia, yakni sebesar 86 juta ton/tahun dari proses pencernaan, dan 18 juta ton/tahun dari kotoran.

Kotoran hewan ruminansia tersebut dapat diolah menjadi biogas yang mengandung CH₄ dari proses fermentasi anaerobik oleh mikroba di dalam tangki tertutup (FAO, 2006). Biogas dengan kandungan metana akan menghasilkan pembakaran yang cukup bersih tanpa menghasilkan jelaga (Kasikamphaiboon, dkk., 2013). Dampak negatif gas metana dapat dikurangi dengan memanfaatkannya sebagai bahan bakar (Allo, dan Widjasena, 2019). Setelah biogas dimurnikan, biogas bisa digunakan sebagai bahan bakar co-generator (Detman, dkk., 2017). Selain untuk bahan bakar rumah tangga, biogas dengan kadar metana yang cukup tinggi dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin CNG pada industri (Saleh, dkk., 2015).

2.3 Gas *Impurities* Biogas

Biogas yang dihasilkan dari proses fermentasi juga menghasilkan gas lain selain metana, gas-gas lain ini disebut juga gas *impurities* biogas. Gas *impurities* ini dapat berupa karbondioksida (CO_2), H_2S , amoniak, nitrogen, dan oksigen (O_2):

a. Karbondioksida (CO_2)

CO_2 dihasilkan dari pernafasan aerob maupun anaerob yang terurai dari golongan senyawa gula oleh bakteri (Mara, 2012). CO_2 pada biogas akan menurunkan nilai kalori, *anti-knock properties of engines*, dan korosi (Tabatabaei & Ghanavati, 2018).

Sifat-sifat fisika CO_2 :

- Berat molekul = 44,01
- *Melting point* = $-56,6^\circ\text{C}$ pada 5,2 atm
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 0°C = 179,7 cc
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 20°C = 90,1 cc

b. H_2S

Hidrogen sulfat (H_2S) bersifat berbahaya untuk manusia dan hewan. jika gas ini dalam konsentrasi rendah akan menimbulkan bau yang tidak sedap, pada konsentrasi tinggi akan mengancam hidup (Horikawa, dkk., 2004).

Sifat-sifat fisika H_2S :

- Berat molekul = 34,08
- *Melting point* = $-82,9^\circ\text{C}$
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 0°C = 437 cc
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 40°C = 186 cc

c. Amoniak

Amoniak terbentuk dari hasil penguraian protein dan senyawa-senyawa lain yang mengandung nitrogen (Mara, 2012).

Sifat-sifat fisika amoniak:

- Berat molekul = 17,03
- *Melting point* = $-77,7^\circ\text{C}$
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 0°C = 89,9 cc

- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 96°C = 7,4 cc

d. Nitrogen (N₂)

Gas nitrogen dihasilkan dari proses denitrifikasi, yaitu proses penguraian nitrat maupun nitrit yang terjadi pada tempat tertutup (Mara, 2012). Nitrogen pada biogas akan menurunkan nilai kalori, sifat *anti-knocking* mesin, dan korosi (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). Wellinger dan Lindberg (dalam Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018) menyebutkan bahwa nitrogen adalah gas inert yang sulit dihilangkan selama pemurnian.

Sifat-sifat fisika N₂:

- Berat molekul = 28,01
- *Melting point* = -209,86°C
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 0°C = 2,35 cc
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 20°C = 1,55 cc

e. Oksigen

Oksigen pada biogas akan mengakibatkan korosi, pengotor di tempat penyimpanan, dan dapat menyebabkan terbentuknya campuran yang mudah meledak (Tabatabaei & Ghanavati, 2018). Kadar O₂ <0,5% dalam biometana diperbolehkan (Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018).

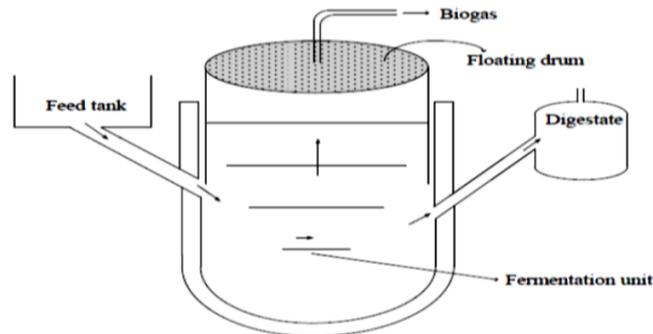
Sifat-sifat fisika O₂:

- Berat molekul = 32
- *Melting point* = -218,4°C
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 0°C = 4,89 cc
- *Solubility* pada 100 cc air, suhu 30° = 2,6 cc

2.4 Biodigester

Menurut Raja dan Wazir (2017), terdapat beberapa jenis biodigester (reaktor biogas), namun ada dua jenis biodigester yang populer, yaitu *floating-drum reactors*, dan *fixed dome reactors*.

2.4.1 Floating-drum Reactors



Sumber: (Ramatsa, dkk., 2014)

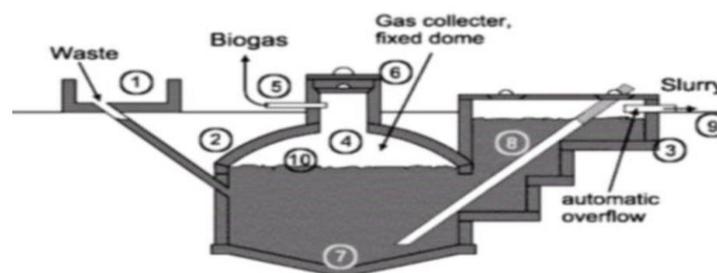
Gambar 2.4 Skema *floating drum digester*

Floating-drum Reactors merupakan biodigester yang berbentuk silindris atau kubah dilengkapi dengan *gas-holder* bergerak yang dibangun dibawah tanah. Gas ditampung di dalam suatu *gas-holder* yang bergerak naik dan turun sesuai dengan volume gas yang tertampung didalamnya. *Gas-holder* dilengkapi dengan kerangka agar tidak terjadi kemiringan saat bergerak keatas (Raja, dan Wazir, 2017).

Floating-drum memiliki konstruksi yang relatif mudah. Namun disamping itu, *floating-drum* memiliki kerugian dari segi biaya, yaitu biaya drum baja yang tinggi, dan biaya perawatan rutin. Selain itu, bagian baja yang digunakan pada konstruksi rentan terhadap korosi (Raja, dan Wazir, 2017).

2.4.2 Fixed Dome

Salah satu contoh prinsip kerja biodigester *fixed dome* secara ringkas dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut:



Sumber: Kalsum, dkk., 2020

Gambar 2.5 Prinsip Kerja Biodigester *Fixed Dome*

Konstruksi biodigester *fixed dome* terdiri dari *gas-holder* yang tidak bergerak. Untuk mengetahui volume gas yang terdapat pada biodigester *fixed*

dome dapat dilihat dari tekanan pada biodigester. Tekanan akan naik seiring dengan bertambahnya volume yang tertampung dalam biodigester.

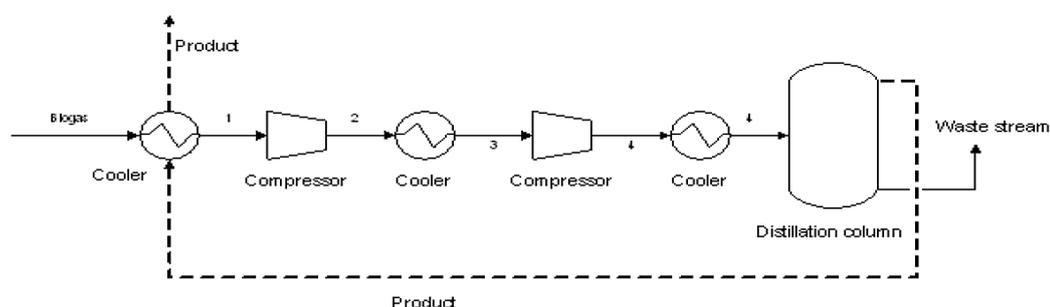
Biodigester *fixed dome* merupakan salah satu jenis biodigester yang relative murah, dan sederhana. Jika biodigester *fixed dome* dibangun di bawah tanah, maka tanah akan melindunginya dari kerusakan fisik dan akan menghemat ruang. Namun, pembangunan biodigester bawah tanah tidaklah mudah. Karna biodigester *fixed dome* hanya boleh dibangun di mana bangunan tersebut dapat diawasi oleh teknisi biogas yang berpengalaman (Raja, dan Wazir, 2017).

2.5 Metode Pemurnian Biogas

Terdapat beberapa metode dalam pemurnian biogas, yaitu separasi *cryogenic* (CS), separasi membran, *pressure swing adsorption* (PSA), dan absorpsi (Khan, dkk., 2017). Untuk lebih jelas, dapat dilihat pada penjelasan berikut:

2.5.1 Separasi *Cryogenic* (CS)

Prinsip pemisahan biogas secara *Cryogenic* berdasarkan pada perbedaan gas seperti CO_2 dan H_2S yang dicairkan pada perbedaan tekanan dan temperatur. Metode ini beroperasi pada temperatur yang sangat rendah (-170°C) dan tekanan tinggi (80 bar). Titik didih CH_4 pada tekanan 1 atm yaitu $-161,5^\circ\text{C}$ yang berarti sangat rendah dibandingkan dengan titik didih CO_2 yaitu $-8,2^\circ\text{C}$ yang kemudian dapat dilakukan separasi CO_2 dan H_2S dengan mencairkannya (Andriani, dan Wresta, 2014). Skema pemurnian biogas dengan metode separasi *cryogenic* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut:



Sumber: (Zhao, dkk., 2010)

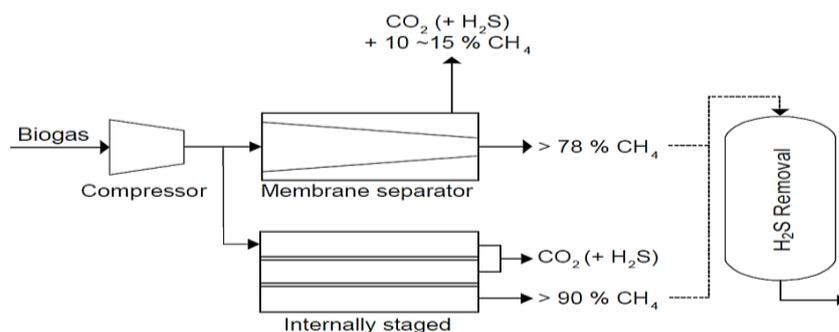
Gambar 2.6 Skema Pemurnian Biogas dengan metode Separasi *Cryogenic*

Aliran *Raw biogas* melewati *heat exchanger* pertama yang berfungsi untuk menurunkan temperatur gas sampai 70°C (Zhao, dkk., 2010). Lalu gas dikompresi

dengan kompresor, sehingga temperatur gas turun sampai -100°C dan tekanan menjadi 40bar, yang selanjutnya dimasukkan ke kolom destilasi (Zhao, dkk., 2010). Pada kolom destilasi inilah terjadi pemisahan CH_4 dengan kontaminan, seperti CO_2 , dan H_2S (Zhao, dkk., 2010).

2.5.2 Separasi Membran

Prinsip separasi membran yaitu beberapa komponen dari *raw biogas* ditransport melalui membran tipis, CH_4 akan melewati membran, sedangkan gas lain akan tertahan (Zhao, dkk., 2010). Hal ini terjadi berdasarkan kelarutan komponen (Zhao, dkk., 2010). *Solid membrane* memberikan permukaan per volume yang luas, dan merupakan unit yang padat (Zhao, dkk., 2010). Tekanan yang digunakan pada rentang 25-40 bar (Zhao, dkk., 2010). Salah contoh *flow chart* pemurnian biogas dengan menggunakan membran dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut:



Sumber: (Zhao, dkk., 2010)

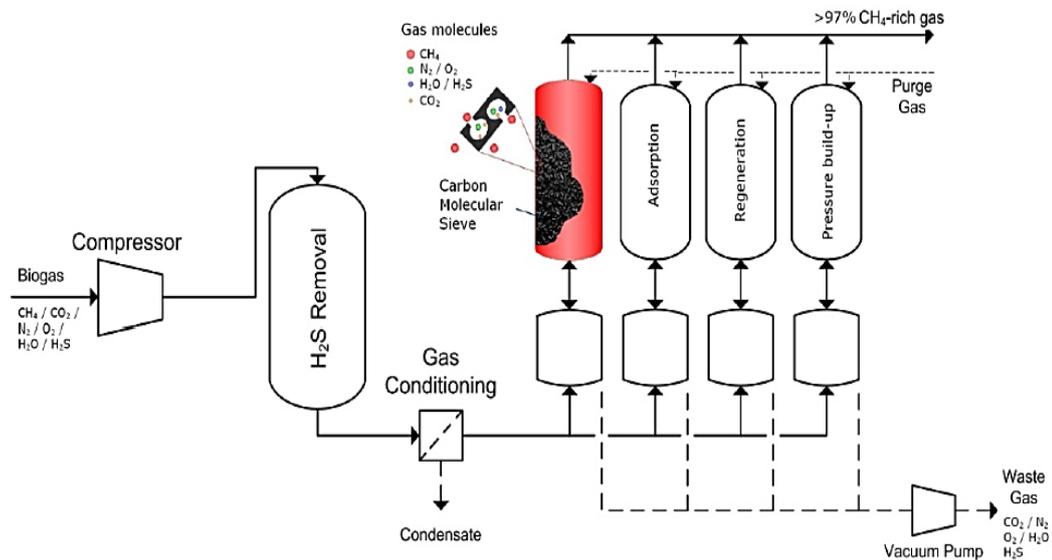
Gambar 2.7 Flow Chart Pemurnian Biogas dengan Membran

Untuk menjelaskan separasi membran, secara umum terdapat dua model yang digunakan, yaitu difusi larutan, dan model *pore-flow*. Model pertama, dikarenakan perbedaan konsentrasi, maka terjadi difusi melalui membran yang menyerap didalam material membran. Model kedua yaitu dipisahkan dengan penyerapan karena didorong oleh tekanan aliran konvektif melalui pori-pori kecil (Rongwong, dkk., 2012).

2.5.3 Pressure Swing Adsorption (PSA)

PSA merupakan teknologi yang digunakan untuk memisahkan beberapa gas dari suatu campuran gas berdasarkan karakteristik molekul gas, dan daya gabung

dengan absorben dalam keadaan bertekanan (Zhao, dkk., 2010). Semakin tinggi tekanan, maka semakin banyak gas yang terserap, saat tekanan gas diturunkan, gas akan dilepaskan (Zhao, dkk., 2010). Skema proses pemurnian biogas dengan metode PSA dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut:



Sumber: (Zhao, dkk., 2010)

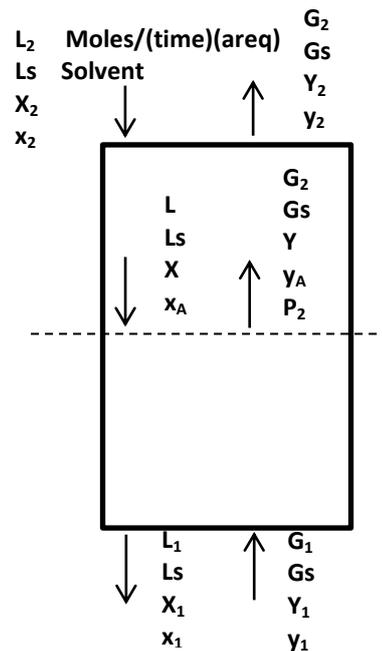
Gambar 2.8 Skema Proses Pemurnian Biogas dengan Metode *Pressure Swing Adsorption*

Teknik pemurnian biogas dapat dilakukan dengan metode adsorpsi, yaitu pemisahan suatu gas tertentu dari campuran gas-gas dengan cara pemindahan massa kedalam suatu liquid yang mempunyai selektivitas pelarut yang berbeda dari gas yang akan dipisahkannya (Ritonga & Masrukhi, 2017). Dengan menggunakan metode ini, metana yang akan didapat bisa mencapai 95-99% (Detman, dkk., 2017).

2.5.4 Absorpsi Gas

Absorpsi adalah proses pemisahan bahan dari suatu campuran gas dengan cara pengikatan bahan tersebut pada permukaan absorben cair yang diikuti dengan pelarutan (Cundari, dkk., 2015).

Berikut merupakan ilustrasi proses absorpsi menurut (Treybal, 1981):



Sumber: Treybal, 1981

Gambar 2.9 Jumlah aliran pada absorber atau stripper

Untuk melarutkan satu atau lebih komponen dalam gas, dapat dilakukan dengan mengkontakkan gas dengan cairan, peristiwa ini disebut dengan absorpsi gas (Treybal, 1981). Metode absorpsi sering digunakan untuk menghilangkan kandungan CO_2 dan H_2S pada industri kimia (Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018). Prinsip pemisahan ini berdasarkan kelarutan zat terlarut (pengotor gas) dalam pelarut, sehingga metana tidak ikut terlarut (Singhal, dkk., 2017). Metode absorpsi didesain untuk beroperasi dengan waktu tinggal biogas yang rendah pada tekanan dan temperatur *ambient* (Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018). CO_2 memiliki sifat yang lebih mudah larut dalam cairan dibandingkan dengan CH_4 , sehingga gas yang melewati kolom akan memiliki konsentrasi CH_4 yang tinggi, dan cairan yang melewati kolom akan memiliki konsentrasi CO_2 yang tinggi pula (Cozma, dan Ghinea, 2013).

Menurut (Ardhiany, 2018), berdasarkan proses penyerapan, absorpsi dibedakan menjadi dua :

a. Absorpsi Fisik

Absorpsi fisik merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam larutan penyerap tidak disertai dengan reaksi kimia. Contoh reaksi ini adalah absorpsi gas

H₂S dengan air, metanol, propilen karbonase. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik.

b. Absorpsi Kimia

Absorpsi kimia merupakan absorpsi dimana gas terlarut dalam larutan penyerap disertai dengan adanya reaksi kimia. Contoh absorpsi ini adalah absorpsi gas CO₂ dengan larutan MEA, NaOH, K₂CO₃ dan sebagainya. Aplikasi dari absorpsi kimia dapat dijumpai pada proses penyerapan gas CO₂ pada pabrik amoniak.

Faktor yang mempengaruhi laju absorpsi menurut Ardhiany (2018) yaitu:

a. Luas permukaan kontak

Semakin besar permukaan gas dan pelarut yang kontak, maka laju absorpsi yang terjadi juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan, permukaan kontak yang semakin luas akan meningkatkan peluang gas untuk berdifusi ke pelarut.

b. Laju alir fluida

Jika laju alir fluida semakin kecil, maka waktu kontak antara gas dengan pelarut akan semakin lama. Dengan demikian, akan meningkatkan jumlah gas yang berdifusi.

c. Konsentrasi gas

Perbedaan konsentrasi merupakan salah satu *driving force* dari proses difusi yang terjadi antar dua fluida.

d. Tekanan operasi

Peningkatan tekanan akan meningkatkan efisiensi pemisahan.

e. Temperatur komponen terlarut dan pelarut

Temperatur pelarut hanya sedikit berpengaruh terhadap laju absorpsi.

f. Kelembaban Gas

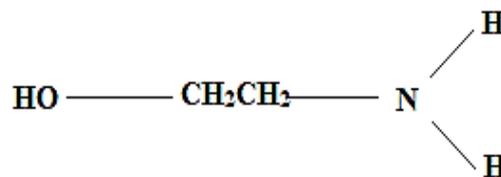
Kelembaban yang tinggi akan membatasi kapasitas gas untuk mengambil kalor laten, hal ini akan mengganggu dalam proses absorpsi. Dengan demikian, proses *dehumidification gas* sebelum masuk ke dalam kolom *absorber* sangat dianjurkan.

Dalam proses absorpsi, dikenal dengan istilah absorben, dan absorbat. Absorbat adalah zat yang akan terserap ke dalam absorben. Sedangkan cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi pada permukaannya, baik secara fisik maupun dengan reaksi kimia disebut absorben (Cundari, dkk., 2015). Berbeda dengan adsorben yang memiliki permukaan dalam yang luas, permukaan luar absorben yang harus dibuat luas (Cundari, dkk., 2015). Menurut (Ardhiany, 2018) absorben yang baik harus memenuhi syarat-syarat berikut:

- a. Memiliki daya melarutkan yang baik, dan bersifat selektif terhadap apa yang diserap.
- b. Memiliki tekanan uap, dan viskositas yang rendah.
- c. Tidak mudah menyebabkan terjadinya korosi pada peralatan.
- d. Stabil secara termis
- e. Murah dan mudah didapat

Berikut merupakan beberapa jenis absorben yang telah digunakan pada pemurnian biogas.

- a. Monoethanolamine (MEA)



Sumber: Cekanova, 2011

Gambar 2.10 Struktur molekul *Monoethanolamine* (MEA)

Sifat Monoethanolamine:

Rumus Kimia	: C ₂ H ₇ NO
Densitas	: 1,015-1,018 kg/liter
Berat Molekul	: 61,08 Kgmol/kmol

MEA adalah suatu larutan amina primer yang berpotensi untuk menyerap hidrogen sulfida dan baik digunakan pada proses absorpsi karbon dioksida (Maile, dkk., 2017). Kolh, dan Nielsen (dalam Huertas, dkk., 2015) menjelaskan bahwa amina adalah turunan ammonia yang memiliki satu atau lebih atom hidrogen yang digantikan dengan radikal organik. Larutan MEA dapat digunakan untuk menghilangkan CO₂ dari gas pembakaran, dan dapat diaplikasikan untuk

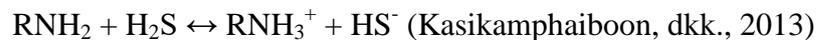
pengurangan gas rumah kaca (Dang & Rochelle, 2003). Larutan MEA juga banyak digunakan untuk menghilangkan karbon dioksida dari aliran di proses kilang, dan aliran natural gas (Dang & Rochelle, 2003). Larutan MEA merupakan larutan absorben alkanolamin yang sering digunakan karena sangat bereaksi dengan CO₂, larutan yang murah, dan bisa diregenerasi dengan mudah (Mandal, dkk., 2003).

Menurut Choi, dkk., (dalam Kasikamphaiboon, dkk., 2013), sudah diterima secara umum bahwa reaksi keseluruhan CO₂ dengan RNH₂ seperti MEA dapat dituliskan sebagai berikut:



Proses absorpsi terjadi pada temperatur 70°C (Lin, dan Shyu, 2000). Dengan menyerap CO₂ pada biogas, maka kemurnian kandungan CH₄ akan meningkat. MEA memiliki kapasitas penyerapan fisik dan kimia yang dipengaruhi oleh suhu, tekanan, tambahan gas, dan konsentrasi larutan MEA.

Reaksinya Al-Baghli, dkk., (dalam Kasikamphaiboon, dkk., 2013) ditunjukkan dalam reaksi berikut:



Reaksi H₂S dan MEA bersifat reversibel dan seketika. H₂S bereaksi dengan MEA melalui transfer proton.

b. Air

Dalam absorpsi gas-cair, air dapat digunakan sebagai pelarut yang murah dan ramah lingkungan untuk menghilangkan CO₂ (Budzianowski, dkk., 2017). Metode absorpsi dengan menggunakan air sering digunakan di industri biogas (Bauer, dkk., 2013). Air dan biogas dikontakkan dengan aliran bertekanan yang berlawanan arah di dalam kolom *packing* untuk memperluas area kontak. Sifat kelarutan CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan dengan CH₄ memungkinkan penggunaan air untuk menghilangkan CO₂ secara selektif (Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018). Sehingga pada saat terjadi absorpsi di dalam kolom, konsentrasi CH₄ meningkat dengan menghilangkan banyak CO₂ (Nock, dkk., 2014). Laju penyerapan CO₂ oleh air harus ditingkatkan karena kelarutan CO₂ yang lemah dalam air (Budzianowski, dkk., 2017). Kelarutan CO₂ dapat

ditingkatkan dengan menaikkan tekanan parsial CO₂ itu sendiri, maka tekanan pada *scrubber* sering diatur 0,8 dan 1,2 MPa (Budzianowski, dkk., 2017). Reaksi yang terjadi diantara CO₂ dan air menurut Srichat, dkk., (2017) dapat dilihat pada reaksi berikut:



Selain CO₂, air juga dapat menyerap H₂S (Tabatabaei, dan Ghanavati, 2018). H₂S membutuhkan perawatan tambahan untuk mengurangi kandungannya, sehingga memerlukan biaya yang tinggi per unit H₂S (Budzianowski, dkk., 2017). Karena mikroorganisme sulfur tidak cocok dengan lingkungan bersuhu tinggi, kandungan H₂S pada biogas dapat dibatasi dengan menerapkan proses digesti anaerobik termofilik (Budzianowski, dkk., 2017).

Proses absorpsi dengan menggunakan air sebagai absorben biasanya dilakukan pada tekanan tinggi dengan jumlah air yang digunakan tergantung pada tekanan dan suhu operasi (Bauer, dkk., 2013). Terdapat dua metode absorpsi dengan menggunakan air, yaitu *scrubbing* dengan air regenerasi dan *scrubbing* dengan air tanpa regenerasi (Sugiharto, dkk., 2015). *Scrubbing* dengan air yang diregenerasi membutuhkan lebih banyak konsumsi energi, namun hanya memerlukan pelarut air yang sedikit (Sugiharto, dkk., 2015).

c. Ca(OH)₂

Didapat efisiensi penghilangan CO₂ sebesar lebih dari 71% pada konsentrasi kalsium hidroksida sebesar 14%, dan menghasilkan peningkatan CH₄ sebesar 21,2% (Mel, dkk., 2014). Konsentrasi kalsium hidroksida sangat berpengaruh dengan efisiensi penghilangan CO₂ (Mel, dkk., 2014). Dengan konsentrasi kalsium hidroksida yang tinggi, maka akan menghasilkan jumlah ion hidroksida aktif yang tinggi, sehingga proses difusi ke antarmuka gas-cair dan bereaksi dengan CO₂ menjadi semakin baik.

d. NaOH

Kondisi operasi yang digunakan untuk menggunakan NaOH untuk menyerap CO₂ yaitu pada temperatur -1–16°C. Kecepatan penyerapan naik

dengan meningkatnya temperatur. Selain itu, desain sistem absorpsi juga berkaitan dengan temperatur absorpsi (Maile, dkk., 2015)

2.6 Kolom Absorpsi

Kolom Absorpsi adalah suatu kolom atau tabung tempat terjadinya proses absorpsi (penyerapan/penggumpalan) dari zat yang dilewatkan di kolom/tabung tersebut. Secara umum ada empat jenis kolom absorpsi yaitu: menara *spray*, menara gelembung, menara *plate* dan menara *packing* (Ardhiany, 2018).

2.6.1 Menara *spray*

Menara *spray* memiliki prinsip sangat berbeda dengan menara gelembung. Dalam menara *spray* fasa gasnya mengalir naik melalui sebuah ruang terbuka berukuran besar dan fasa cairnya dimasukkan dengan menggunakan *nozzle* semprot atau dengan alat-alat penyemprot lainnya. Cairan yang dimasukkan dalam bentuk butiran-butiran halus, jatuh dengan arus yang berlawanan arah dengan arus gas yang naik ke atas. *Nozzle* semprot didesain untuk menguraikan cairan menjadi tetesan-tetesan kecil dalam jumlah yang besar, untuk suatu laju aliran tertentu, tetesan yang berukuran lebih kecil akan memberikan luas kontak antar fase melintang yang lebih besar. Meskipun begitu, seperti yang juga dijumpai dalam menara gelembung, kehati-hatian dalam mendesain harus dilakukan agar tetesan yang dihasilkan tidak terlalu halus sehingga akan terbawa oleh aliran arus berlawanan yang bergerak keluar (Ardhiany, 2018).

2.6.2 Menara gelembung

Menara gelembung terdiri dari ruang-ruang terbuka berukuran besar yang dilalui oleh fasa cair yang mengalir ke dalam ruang-ruang ini pula gas akan disebarkan ke dalam fasa cair dalam bentuk gelembung-gelembung halus. Gelembung-gelembung gas kecil akan memberikan luas kontak yang diinginkan, gelembung-gelembung yang naik menimbulkan aksi pencampuran di dalam fasa cair, sehingga mengurangi resistensi fasa cair tersebut terhadap *transfer* massa. Menara gelembung digunakan dengan sistem dimana fasa cair biasanya mengontrol laju *transfer* massa (Ardhiany, 2018).

2.6.3 Menara Tray

Menara ini terdiri dari beberapa tipe, yaitu: *Sieve Tray*, *Valve Tray* dan *Bubble Cup Tray* (Ardhiany, 2018).

a. *Sieve Tray*

Sieve Tray atau *Perforated Tray* adalah tray yang terbuat dari lapisan logam datar dengan sejumlah lobang. Setiap tray dilengkapi dengan satu atau lebih *downcomer* untuk membawa cairan turun dari tray yang satu ke tray lain yang ada di bawahnya. Pada operasi normal, uap mengalir melalui lubang-lubang sehingga menyebabkan turbulensi cairan membentuk *froth* sepanjang tray, hingga perpindahan massa uap cairan lebih efisien (Ardhiany, 2018).

b. *Valve Tray*

Jenis ini adalah modifikasi dari *sieve tray*, yang terdiri dari bukaan kolom dan bukaan *valve*. Gerak vertikal dari *cap* yang diizinkan antara $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ inch. Sekarang penggunaannya menurun, karena tipe kolom ini beroperasi pada skala besar sehingga biayanya lebih tinggi 20% dari *sieve tray* (Ardhiany, 2018).

c. *Bubble Cap Tray*

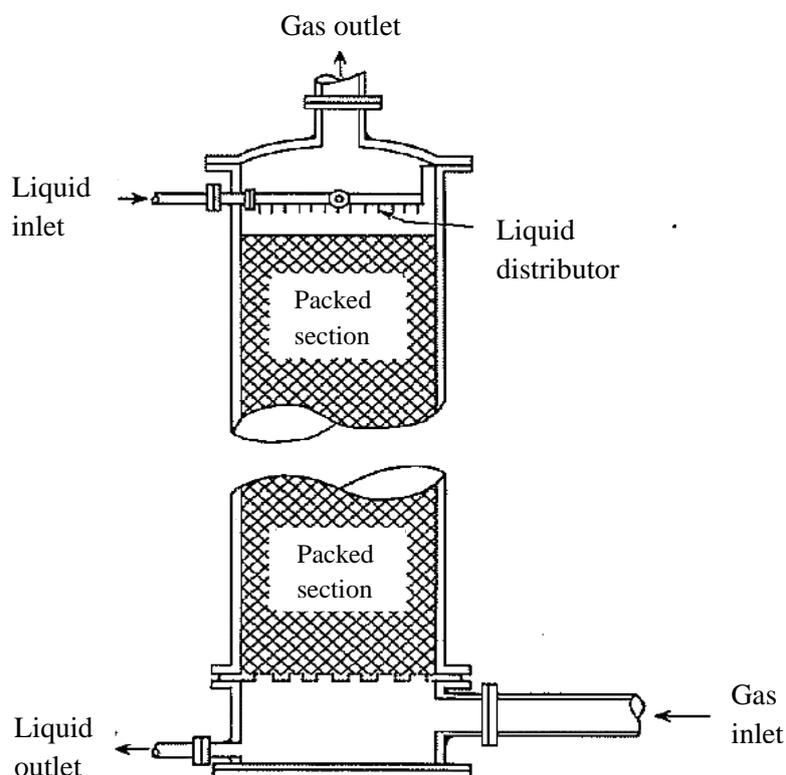
Bubble Cap Tray adalah tray yang menggunakan *bubble cap* untuk mencapai tahap keseimbangan. *Bubble cap* berupa mangkok terbalik yang terletak di atas *riser*, yang mana uap dapat masuk dari bagian bawah tray dan terdispersi pada permukaan bawah cairan melalui celah-celah atau *slot*. *Bubble cap* yang dirancang dengan baik akan memberikan turbulensi massa uap-cairan membentuk *froth* dengan luas antar muka yang besar hingga efisiensi tray tinggi. Jenis ini penggunaannya sejak 100 tahun lalu, tapi sejak tahun 1950 telah digantikan oleh jenis *sieve* atau *valve tray* (Ardhiany, 2018).

2.6.4 Packed Scrubber

Menara *packing* adalah alat yang digunakan dalam penyerapan gas dan operasi-operasi tertentu. Menara *Packing* merupakan menara yang diisi dengan bahan pengisi (Ardhiany, 2018). Di dalam menara ini, cairan akan mengalir ke bawah melalui permukaan bawah pengisi, sedangkan cairan akan mengalir ke atas secara arus berlawanan, melalui ruang kosong yang ada diantara bahan pengisi (Ardhiany, 2018).

Terjadi proses absorpsi di dalam kolom yang berisi *packing* untuk memperluas kontak antara gas dan cairan, selanjutnya *Raw* biogas akan kontak dengan aliran *counter* di dalam kolom tersebut (Khan, dkk., 2017). *Packed scrubber* merupakan salah satu jenis menara *packing*. Scrubber adalah alat yang digunakan untuk menangkap dan menghilangkan zat-zat yang tidak diinginkan (Setyowati, 2017).

Salah satu *packed scrubber* dapat dilihat pada gambar 2.10 berikut:



Sumber: McCabe, dkk., 1993

Gambar 2.11 Menara *packing*

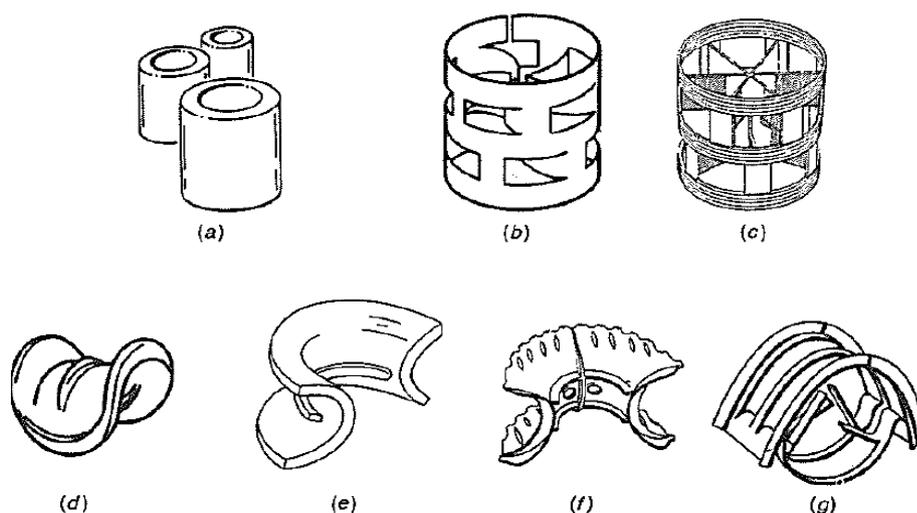
Alat tersebut terdiri dari kolom silinder yang diletakkan *packing* didalamnya, dan dilengkapi dengan saluran masuk gas yang ada pada bagian bawah, absorben didistribusi ke bagian atas menara, hasil pemurnian gas akan keluar pada bagian atas, dan absorben yang telah menyerap zat yang tidak diinginkan keluar melalui bagian bawah (McCabe, dkk., 1993).

2.7 Packing

Packing adalah suatu bahan pada kolom absorpsi untuk memperluas permukaan kontak pada kolom absorpsi (Hadiyanto, dan Djaeni, 2017). Adapun terdapat syarat-syarat pemilihan *packing* menurut Hadiyanto, dan Djaeni (2017), yaitu:

- Memiliki luas permukaan terbasahi tiap unit volume yang besar
- Memiliki ruang kosong yang cukup besar sehingga kehilangan tekanan relatif kecil
- Karakteristik pembasahan baik
- Densitas kecil agar berat kolom keseluruhan kecil
- Tahan korosi
- Ekonomis

Berikut merupakan bentuk-bentuk *packing* menurut (McCabe, dkk., 1993).



Gambar 2.12 (a) Raschig rings; (b) metal Pall ring; (c) plastic Pall ring; (d) Berl saddle; (e) ceramic Intalox saddle; (f) plastic Super Intalox saddle; (g) metal Intalox saddle

Terdapat beberapa *packing* yang baru-baru ini dipelajari, yaitu *open pore polyurethane foam (OPUF)*, *polyester fibers*, *pall rings*, *porous lava rock*, *activated carbon*, *glass beads*, and *perlite*. Berikut karakteristik *packing*-*packing* tersebut dalam (Tayar, dkk., 2019):

Tabel 2.3 Karakteristik Material *Packing*

Material <i>packing</i>	Luas permukaan spesifik ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	Massa jenis ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Porositas (%)
<i>Lava rocks</i>	200 +/- 50	-	-
<i>Plastic fibers</i>	650 +/- 50	-	-
<i>Open pore polyurethane foam</i>	600	35	97
<i>Polypropylene pall rings</i>	320	110	88
<i>Metallic pall rings</i>	515	520	-
<i>Honeycomb</i>	620	-	88

(sumber: Tayar, dkk., 2019)

Fortuny, dkk., (dalam Tayar, dkk., 2019) menyebutkan bahwa *Open pore polyurethane foam* (OPUF) merupakan bahan *packing* komersial yang dikembangkan terutama untuk filtrasi *biotricking*. OPUF memiliki beberapa keuntungan, yaitu massa jenis yang rendah, porositas yang tinggi, luas permukaan spesifik yang tinggi, ukuran pori yang cocok, dan ketahanan terhadap pemadatan (Gabriel dalam (Tayar, dkk., 2019).

Pada *scrubber* kimia, *packing* yang sering digunakan adalah *Pall ring*. Hal ini dikarenakan *pall ring* memberikan *pressure drop* yang rendah, kontak gas-cair yang merata, serta volume bebasnya yang tinggi (Tayar, dkk., 2019). *Polypropylene pall ring* dapat meminimalkan kehilangan tekanan yang disebabkan oleh akumulasi biomassa dan sulfur karena memiliki luas permukaan spesifik yang rendah dibandingkan dengan OPUF dan material *packing* lainnya (Fernandez, dkk., dalam (Tayar, dkk., 2019).

Tabel 2.4 Karakteristik *Packing* menurut (McCabe, dkk., 1993)

Tipe	Bahan	Ukuran, in	Bulk density, Lb/ft ³	Total Area Ft ² /ft ³	Porositas, ϵ	<i>Packing factors</i>	
						F _P	f _P
<i>Raschig rings</i>	Keramik	½	55	112	0,64	580	1,52
		1	42	58	0,74	155	1,36
		1 ½	43	37	0,73	95	1,0
		2	42	28	0,74	65	0,92
<i>Pall rings</i>	Metal	1	30	63	0,94	56	1,54
		1 ½	24	39	0,95	40	1,36
		2	22	31	0,96	27	1,09
	Plastik	1	5,5	63	0,90	55	1,36
		1 ½	4,8	39		40	1,18
<i>Berl saddles</i>	Keramik	½	54	142	0,62	240	1,58
		1	45	76	0,68	110	1,36
		1 ½	40	46	0,71	65	1,07
<i>Intalox saddles</i>	Keramik	½	46	190	0,71	200	2,27
		1	42	78	0,73	92	1,54
		1 ½	39	59	0,76	52	1,18
		2	38	36	0,76	40	1,0
		3	36	28	0,79	22	0,64
<i>Super Intalox saddles</i>	Keramik	1	-	-	-	60	1,54
		2	-	-	-	30	1,0
<i>IMTP</i>	Metal	1	-	-	0,97	41	1,74
		1 ½	-	-	0,98	24	1,37
		2	-	-	0,98	18	1,19
<i>Hy-Pak</i>	Metal	1	19	54	0,96	45	1,54
		1 ½	-	-	--	29	1,36
		2	14	29	0,97	26	1,09

Sumber: (McCabe, dkk., 1993)