

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Seiring dengan perkembangan teknologi industri yang semakin pesat maka kebutuhan akan sumber energi yang terbarukan (*renewable energy*) menjadi pertimbangan yang sangat penting. Hal ini disebabkan semakin langkanya sumber energi minyak bumi dan semakin tingginya harga minyak mentah dunia, sehingga penelitian – penelitian inovatif terus dikembangkan untuk menemukan sumber energi yang terbarukan. Penelitian – penelitian tersebut tidak hanya untuk menemukan sumber energi baru saja, akan tetapi mampu menemukan sumber energi yang bersifat ramah lingkungan.

Salah satu energi alternatif yang sekarang sedang dikembangkan adalah energi yang berasal dari bahan – bahan organik, hal ini dikarenakan senyawa organik tersebut tergolong energi yang dapat diperbarui. Keberadaan bahan – bahan organik tersebut mudah didapat dan terjamin kontinuitasnya, selain itu yang terpenting bahan – bahan organik tersebut ramah lingkungan. Hal ini yang menjadi faktor utama keberadaan bahan – bahan organik dipertimbangkan sebagai energi masa depan dalam rangka mewujudkan teknologi hijau (*green technology*). Biogas merupakan salah satu produk dari teknologi hijau yang sekarang sedang dikembangkan. Hal ini dikarenakan gas yang dihasilkan dari proses biologis (*anaerobic digester*) mampu menghasilkan gas – gas seperti CH_4 , CO_2 , H_2S , H_2O dan gas – gas lain. Dalam hal ini tentu saja yang dimanfaatkan adalah gas metana (CH_4), karena CH_4 memiliki nilai kalor/panas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Degradasi secara mikrobiologi dari bahan – bahan organik dalam lingkungan anaerob hanya dapat dilakukan oleh mikroorganisme yang mampu memanfaatkan molekul selain oksigen sebagai akseptor hidrogen. Dekomposisi anaerob menghasilkan biogas yang

terdiri dari metana (50 – 70 %), karbondioksida (25 – 45 %) dan sejumlah kecil hidrogen, nitrogen, hydrogen sulfide (Price dan Cheremisinoff,1981).

Kemurnian CH_4 yang dihasilkan dari biogas tersebut menjadi pertimbangan yang sangat penting, hal ini dikarenakan berpengaruh terhadap nilai kalor / panas yang dihasilkan. Sehingga CH_4 yang dihasilkan perlu dilakukan pemurnian terhadap impuritas – impuritas yang lain. Dalam hal ini impuritas yang berpengaruh terhadap nilai kalor/panas adalah CO_2 , keberadaan CO_2 dalam gas CH_4 sangat tidak diinginkan, hal ini dikarenakan semakin tinggi kadar CO_2 dalam CH_4 maka akan semakin menurunkan nilai kalor CH_4 dan sangat mengganggu dalam proses pembakaran. Hal ini menyebabkan kemurnian CH_4 menjadi rendah.

Dalam pemisahan CO_2 dari biogas terdapat berbagai teknologi yang dikembangkan, yaitu :

a. Absorpsi

Untuk metode absorpsi biogas baik secara fisika maupun kimia efektif untuk laju alir gas yang rendah dimana biogas dioperasikan pada kondisi normal. Salah satu metode yang sederhana dan murah yaitu menggunakan air bertekanan sebagai absorben (Shannon, 2000).

b. Adsorpsi Pada Permukaan Zat Padat

Proses adsorpsi permukaan zat padat melibatkan transfer zat terlarut dalam gas menuju ke permukaan zat padat, dimana proses transfer digerakkan oleh gaya Vander wall. Adsorben yang digunakan biasanya berbentuk granular yang mempunyai luas permukaan besar tiap satuan volume. Pemurnian gas dapat menggunakan padatan yang berupa silika, alumina, karbon aktif atau silikat yang kemudian dikenal dengan nama *molecular sieve* (Wise, 1981).

c. Pemisahan Secara Kriogenik

Kriogenik merupakan salah satu metode pemurnian yang melibatkan campuran gas dengan kondensasi fraksional dan destilasi pada temperatur rendah. Dalam proses kriogenik *crude* biogas ditekan hingga mencapai 80 bar. Proses kompresi ini berjalan secara multistage

dengan *intercooler*, biogas bertekanan kemudian dikeringkan untuk menghindari terjadinya pembekuan selama proses pendinginan berlangsung. Kemudian biogas didinginkan oleh chiller dan heat exchanger hingga $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, CO_2 yang terkondensasi dihilangkan didalam separator. Kemudian CO_2 diproses lebih lanjut untuk merecovery metana yang terlarut, hasil *recovery* kemudian di recycle menuju inlet gas. Melalui proses ini gas metana yang dihasilkan mencapai kemurnian 97 % (Hagen dkk., 2001).

d. Pemisahan Dengan Membran

Pada metode ini beberapa komponen atau campuran dari gas ditransportasikan melalui lapisan tipis membran ($< 1\text{mm}$). Transportasi tiap komponen dikendalikan oleh perbedaan tekanan parsial pada membran dan permeabilitas tiap komponen dalam membran. Untuk mencapai gas metana dengan kemurnian yang tinggi maka permeabilitas harus tinggi. Membran padat dapat disusun dari polimer selulosa asetat yang mempunyai permeabilitas untuk CO_2 dan H_2S mencapai 20 dan 60 kali berturut – turut lebih tinggi dibanding permeabilitas CH_4 . Tekanan sebesar 25 – 40 bar diperlukan untuk proses membran tersebut (Hagen dkk., 2001).

Dalam konsep pemisahan dengan membran hal yang paling utama diperhatikan adalah selektifitas dan permeabilitas yang tinggi. Dalam pemisahan CO_2 dengan membran konvensional masalah tersebut dijumpai. Oleh karena itu para peneliti mengembangkan material baru untuk pemisahan CO_2 dengan membran, material itu adalah kombinasi antara polimerik membran dan inorganik membran yang disebut dengan MMMs (*Mixed Matrix Membranes*).

Teknologi pemisahan gas yang telah dikembangkan adalah dengan penggunaan membran. Dalam hal ini digunakan *zeolite Mixed Matrix Membranes* untuk pemisahan CO_2/CH_4 . Pemilihan membran sebagai teknologi pemisahan gas bukan merupakan hal baru. Dua kriteria suatu

teknologi pemisahan akan dipilih jika pertimbangan secara teknis dan ekonomis mudah dilakukan (Mulder, 1996).

1.2 Perumusan Masalah

Di dalam pemisahan gas dengan menggunakan teknologi membran sampai saat ini ada beberapa kendala yang dihadapi antara lain adalah stabilitas membran terhadap gas CO₂ masih rendah disamping itu dengan fluks yang tinggi dihasilkan kemurnian gas CH₄ yang rendah. Pada saat ini perhatian peneliti dibidang membran tertuju pada material baru yaitu composite *Mixed Matrix Membranes*, yang mana material ini merupakan kombinasi dari polimerik inorganik membran. *Mixed Matrix Membranes* merupakan material yang saat ini dikembangkan untuk memperoleh kinerja membran yang maksimal, sehingga didapatkan campuran membran yang memiliki permeabilitas dan selektifitas tinggi.

Mixed Matrix Membranes ini terdiri dari polimer dimana material *non-porous* atau inorganik *dense* seperti partikel *silika*, *zeolite*, *carbon* (disebut *nanotube*) didispersikan. Mekanisme yang terjadi pada membran ini yaitu *solution diffusion* dan dikombinasi dengan *surface diffusion/molecular sieving*.

Menurut Pabby dkk. (2009), aplikasi *Mixed Matrix Membranes* pada pemurnian biogas, misalnya :

- Polimer dengan CMS (*Carbon Molecular Sieves*)
- Polimer dengan *Nonporous Nanoparticles*

Dalam penelitian ini digunakan campuran polyethersulfone – *zeolite Mixed Matrix Membranes*. *Zeolite* adalah senyawa zat kimia alumino-silikat berhidrat dengan kation natrium, kalium dan barium. Secara umum, *zeolite* memiliki molekular sruktur yang unik, dimana atom silikon dikelilingi oleh 4 atom oksigen sehingga membentuk semacam jaringan dengan pola yang teratur. Di beberapa tempat di jaringan ini, atom Silicon digantikan dengan atom Aluminium, yang hanya terkoordinasi dengan 3 atom Oksigen. Atom Aluminium ini hanya memiliki muatan 3⁺, sedangkan Silicon sendiri

memiliki muatan 4^+ . Keberadaan atom Aluminium ini secara keseluruhan akan menyebabkan *zeolite* memiliki muatan negatif. Muatan negatif inilah yang menyebabkan *zeolite* mampu mengikat kation

Zeolite dengan bahan pengisi polimer *polyethersulfone Mixed Matrix Membranes* (MMMs) merupakan alternatif untuk menyiapkan membran pemisahan gas dengan permeabilitas dan selektifitas yang tinggi. Sifat dan karakteristik selektifitas dan penyerapan dari *zeolite* dapat dikombinasikan dengan mudah untuk memperoleh sifat *zeolite* Mixed Matrik Membran (MMM) yang baik. Perubahan kinerja membran sangat dipengaruhi oleh bentuk fisik dari hasil pencampuran polimer yang heterogen (Suer dkk,1994). Ketidakesesuaian antara kristal *zeolite* dan rantai polimer dapat mengakibatkan pembentukan ruang kosong pada bagian interface, sehingga menyebabkan kinerja pemisahan dari *Mixed Matrix Membranes* (MMM) menurun (Mahajan, 2002). Salah satu cara untuk mengurangi ruang kosong pada interface dengan menggunakan kompatibiliser, yaitu suatu campuran dengan berat molekul yang rendah dimana akan menghubungkan *zeolite* dan polimer dengan interaksi kedua fase.

Makin tinggi permeabilitas suatu gas dalam membran, makin rendah selektivitasnya. Untuk itu diperlukan jenis membran dan kondisi operasi yang memberikan permeabilitas dan selektivitas yang optimum bagi pemisahan gas. Pengaruh sifat, karakteristik, dan struktur membran *zeolite* mix matrik terhadap permeabilitas dan selektivitas gas merupakan permasalahan pertama yang akan diamati dalam pemisahan gas CO_2/CH_4 . Diharapkan dari selektivitas yang tinggi akan diperoleh CH_4 dengan kemurnian yang tinggi sehingga akan meningkatkan nilai kalor dari biogas tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Pada penelitian mengenai ‘Studi Karakterisasi Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes* Untuk Pemurnian Biogas’ memiliki tujuan antara lain :

- Untuk mengetahui kinerja dari Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes*
- Untuk mengetahui sifat dan karakteristik dari Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes*
- Untuk mengetahui pengaruh pemanasan (*heat treatment*) terhadap kinerja dari Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

1.4 Manfaat Penelitian

Pada penelitian mengenai ‘Studi Karakterisasi Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes*’ memiliki manfaat antara lain:

- Dapat mengetahui tingkat keberhasilan Asimetris *Polyimide Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone – Polyimide Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone – Zeolite Mixed Matrix Membranes* dalam memisahkan CO₂/CH₄ dari segi ekonomis dan teknis.
- Dapat mengaplikasikan teknologi membran pada pemisahan biogas dengan selektivitas dan permeabilitas tinggi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biogas Sebagai Alternatif Energi Biomassa

2.1.1. Pengertian Biogas

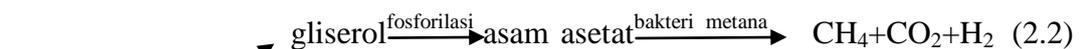
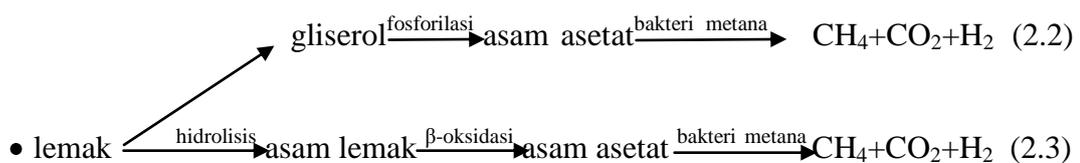
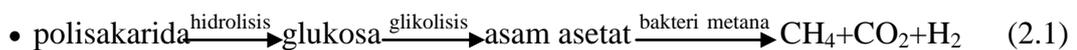
Biogas merupakan bahan bakar gas dan bahan bakar yang dapat diperbaharui (*renewable fuel*) yang dihasilkan secara *anaerobic digestion* atau fermentasi anaerob dari bahan organik dengan bantuan bakteri metana seperti *Methanobacterium sp.* Bahan yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan biogas yaitu bahan *biodegradable* seperti biomassa (bahan organik bukan fosil), kotoran, sampah padat hasil aktivitas perkotaan dan lain-lain. Akan tetapi, biogas biasanya dibuat dari kotoran ternak seperti kerbau, sapi, kambing, kuda dan lain – lain. Kandungan utama biogas adalah gas metana (CH_4) dengan konsentrasi sebesar 50 – 80 % vol. Kandungan lain dalam biogas yaitu gas karbon dioksida (CO_2), gas hidrogen (H_2), gas nitrogen (N_2), gas karbon monoksida (CO) dan gas hidrogen sulfida (H_2S). Gas dalam biogas yang dapat berperan sebagai bahan bakar yaitu gas metana (CH_4), gas hidrogen (H_2) dan gas CO (Price dan Cheremisinoff, 1981).

2.1.2. Proses Pembuatan Biogas

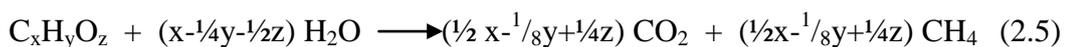
Proses pembuatan biogas dilakukan secara fermentasi yaitu proses terbentuknya gas metana dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri anaerob di dalam suatu digester sehingga akan dihasilkan gas metana (CH_4) dan gas karbon dioksida (CO_2) yang volumenya lebih besar dari gas hidrogen (H_2), gas nitrogen (N_2) dan asam sulfida (H_2S). Proses fermentasi memerlukan waktu 7 sampai 10 hari untuk menghasilkan biogas dengan suhu optimum 35 °C dan pH optimum pada *range* 6,4 – 7,9. Bakteri pembentuk biogas yang digunakan yaitu bakteri anaerob seperti *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* dan *Methanosarcina* (Price dan Cheremisinoff, 1981).

Biogas yang dibuat dari kotoran ternak sapi mengandung gas metana (CH₄) sebesar 55 – 65 %, gas karbon dioksida (CO₂) sebesar 30 – 35 % dan sedikit gas hidrogen (H₂), gas nitrogen (N₂) dan gas – gas lain. Panas yang dihasilkan sebesar 600 BTU/cuft. Sedangkan, biogas yang dibuat dari gas alam mengandung gas metana (CH₄) sebesar 80 % dengan panas sebesar 1000 BTU/cuft. Kandungan gas metana (CH₄) dari biogas dapat ditingkatkan dengan memisahkan gas karbon dioksida (CO₂) dan gas hidrogen sulfida (H₂S) yang bersifat korosif (Price dan Cheremisinoff, 1981).

Reaksi pembentukan metana (Price and Paul, 1981) dari bahan – bahan organik yang dapat terdegradasi dengan bantuan enzim maupun bakteri dapat dilihat sebagai berikut:



Secara umum, reaksi pembentukan CH₄ yaitu :



Sebagai contoh, pada pembuatan biogas dari bahan baku kotoran sapi atau kerbau yang banyak mengandung selulosa. Bahan baku dalam bentuk selulosa akan lebih mudah dicerna oleh bakteri anaerob. Reaksi pembentukan CH₄ adalah : (Price dan Cheremisinoff, 1981).

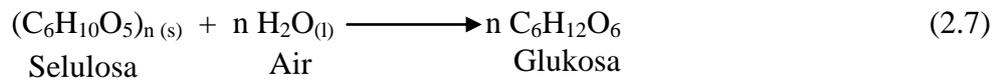


Reaksi kimia pembuatan biogas (gas metana) ada 3 tahap, yaitu :

1. Reaksi Hidrolisa / Tahap pelarutan

Pada tahap ini bahan yang tidak larut seperti selulosa, polisakarida dan lemak diubah menjadi bahan yang larut dalam air seperti karbohidrat dan asam lemak. Tahap pelarutan berlangsung pada suhu 25° C di digester (Price dan Cheremisinoff, 1981).

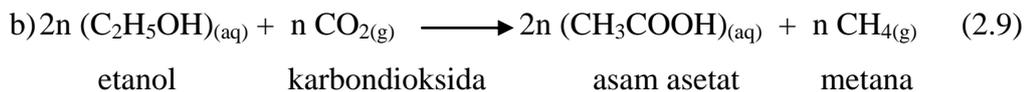
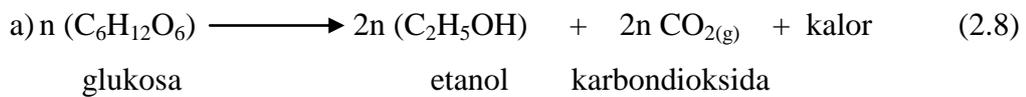
Reaksi:



2. Reaksi Asidogenik / Tahap pengasaman

Pada tahap ini, bakteri asam menghasilkan asam asetat dalam suasana anaerob. Tahap ini berlangsung pada suhu 25° C di digester (Price dan Cheremisinoff, 1981).

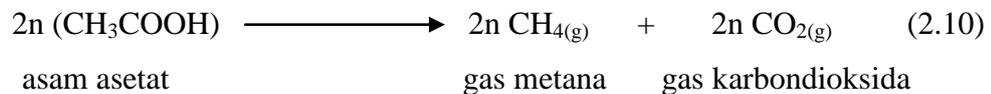
Reaksi:



3. Reaksi Metanogenik / Tahap gasifikasi

Pada tahap ini, bakteri metana membentuk gas metana secara perlahan secara anaerob. Proses ini berlangsung selama 14 hari dengan suhu 25° C di dalam digester. Pada proses ini akan dihasilkan 70% CH₄, 30 % CO₂, sedikit H₂ dan H₂S (Price dan Cheremisinoff, 1981). Berbagai jenis bakteri yang digunakan untuk menghasilkan gas metana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Reaksi:



Tabel 2.1 Berbagai Macam Bakteri Penghasil Metana dan Substratnya
(Khandelwal,1978)

Bakteri	Substrat	Produk
<i>Methanobacterium formicum</i>	CO H ₂ + CO ₂ Formate	CH ₄
<i>Methanobacterium mobilis</i>	H ₂ + CO ₂ Formate	CH ₄
<i>Methanobacterium propionicum</i>	Propionate	CO ₂ + Acetate
<i>Methanobacterium ruminantium</i>	Formate H ₂ + CO ₂	CH ₄
<i>Methanobacterium sohngeniei</i>	Acetate butyrate	CH ₄ + CO ₂
<i>Methanobacterium suboxydans</i>	Caproate dan butyrate	Propionate dan Acetate
<i>Methanococcus mazei</i>	Acetate dan Butyrate	CH ₄ + CO ₂
<i>Methanobacterium vannielii</i>	H ₂ + CO ₂ Formate	CH ₄
<i>Methanosarcina barkeri</i>	H ₂ + CO ₂ Methanol Acetate	CH ₄ CH ₄ CH ₄ + CO ₂
<i>Methanobacterium methanica</i>	Acetate Butyrate	CH ₄ + CO ₂

2.1.3. Komposisi Biogas

Menurut Wellinger and Lindenberg (2000), komposisi biogas yang dihasilkan sangat tergantung pada jenis bahan baku yang digunakan. Namun demikian, komposisi biogas yang utama adalah gas metana (CH₄) dan gas karbon dioksida (CO₂) dengan sedikit hidrogen sulfida (H₂S). Komponen lainnya yang ditemukan dalam kisaran konsentrasi kecil (*trace element*) antara lain senyawa sulfur organik, senyawa hidrokarbon terhalogenasi (*Halogenated hydrocarbons*), gas hidrogen (H₂), gas nitrogen (N₂), gas karbon monoksida (CO) dan gas oksigen (O₂). Komposisi utama yang terdapat dalam biogas ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Komponen Utama Biogas (Hambali, 2007 dan Widarto,1997)

No.	Komponen	Satuan	Komposisi	
			1	2
1.	Gas Methan (CH ₄)	% Vol	50 – 75	54 – 70
2.	Karbon dioksida (CO ₂)	% Vol	24 – 40	27 – 45
3.	Nitrogen (N ₂)	% Vol	< 2	0 – 1
4.	Hidrogen (H ₂)	% Vol	< 1	0 – 1
5.	Karbon monoksida (CO)	% Vol		0,1
6.	Oksigen (O ₂)	Ppm	< 2	0,1
7.	Hidrogen sulfida (H ₂ S)	Ppm	< 2	Sedikit

2.1.4. Nilai Kalor Pembakaran Biogas

Panas pembakaran dari suatu bahan bakar adalah panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna bahan bakar pada volume konstan dalam kalorimeter dan dinyatakan dalam kal/kg atau Btu/lb. Panas pembakaran dari bahan bakar bisa dinyatakan dalam *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). *High Heating Value* merupakan panas pembakaran dari bahan bakar yang di dalamnya masih termasuk *latent heat* dari uap air hasil pembakaran. *Low Heating Value* merupakan panas pembakaran dari bahan bakar setelah dikurangi *latent heat* dari uap air hasil pembakaran Nilai kalor pembakaran yang terdapat pada biogas berupa *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV) pembakarannya dapat diperoleh dari Tabel 2.3 berikut (Price dan Cheremisinoff,1981).

Tabel 2.3 Nilai Kalor Pembakaran Biogas dan Natural Gas (Price dan Cheremisinoff,1981).

Komponen	<i>High Heating Value</i>		<i>Low Heating Value</i>	
	(Kkal/m ³)	(Kkal/kg)	(Kkal/m ³)	(Kkal/kg)
Hidrogen (H ₂)	2.842,21	33.903,61	2.402,62	28.661,13
Karbon monoksida (CO)	2.811,95	2.414,31	2.811,95	2.414,31
Gas Methan (CH ₄)	8.851,43	13.265,91	7.973,13	11.953,76
Natural gas	9.165,55	12.943,70	8.320,18	11.749,33

2.1.5. Karakteristik Kandungan Biogas

a. Gas Metana (CH₄)

Sifat fisika metana sebagai berikut :

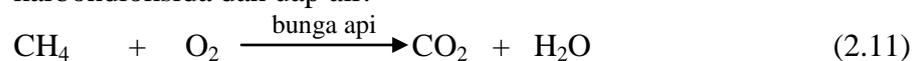
- Berat molekul : 16,04 gram/mol
- Densitas : $7,2 \times 10^{-4}$ gram/ml (pada 1 atm dan 0°C)
- Titik didih : -161,4 °C
- Titik leleh : -182,6 °C (Perry, 1997)
- Nilai kalor CH₄ : 13.279,302 Kkal/kg (Fessenden, 1989)
- Nilai kalor biogas : 6.720 – 9660 Kkal/kg (Harasimowicz dkk., 2007)
- d_p : $3,8 \text{ \AA}$ (Wen-Hui Lin dkk., 2001)
- T_c : 109,4 K (Pabby dkk., 2009)
- Solubilitas metana dalam air dapat dilihat dalam Tabel 2.4. berikut:

Tabel 2.4 Solubilitas Metana dalam Air (Perry,1997)

T, °C	0	5	10	15	20	25	30	35
10⁻⁴x H	2,24	2,59	2,97	3,37	3,76	4,13	4,49	4,86
T, °C	40	45	50	60	70	80	90	100
10⁻⁴x H	5,20	5,51	5,77	6,26	6,66	6,82	6,92	7,01

Sifat kimia metana (Fessenden, 1989) sebagai berikut :

- Reaksi pembakaran sempurna gas metana menghasilkan gas karbondioksida dan uap air.



- Reaksi halogenasi gas metana menghasilkan klorometana dan HCl



b. Karbon dioksida (CO₂)

Sifat fisika karbon dioksida (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 44,01 gram/mol
- Densitas : $1,98 \times 10^{-3}$ gram/ml (pada 1 atm dan 0°C)
- Titik leleh : -55,6 °C (pada tekanan 5,2 atm)
- Titik didih : -78,5 °C

- d_p : $3,3 \text{ \AA}$ (Wen-Hui Lin dkk., 2001)
- T_c : 304K (Pabby dkk., 2009)

Sifat kimia karbon dioksida sebagai berikut :

- Karbon dioksida bereaksi dengan natrium hidroksida membentuk natrium karbonat (Vogel, 1985).



c. Nitrogen (N₂)

Sifat fisika nitrogen (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 28,02 gram/mol
- Densitas : $1,25 \times 10^{-3}$ gram/ml (pada 1 atm dan 0°C)
- Titik didih : -195,8 °C
- Titik leleh : -209,86 °C

Sifat kimia nitrogen (Fessenden, 1989) sebagai berikut :

- Merupakan senyawa *inert* (sukar bereaksi)
- Merupakan senyawa dwiatomik

d. Hidrogen (H₂)

Sifat fisik Hidrogen (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 2,016 gr/mol
- Densitas : $8,97 \times 10^{-5}$ gram/ml (pada 1 atm dan 0°C)
- Titik leleh : -259,1 °C
- Titik didih : -252,7 °C

Sifat kimia Hidrogen (Vogel, 1985) sebagai berikut :

- Hidrogen dapat digunakan sebagai potensial standart oksidasi-reduksi pada temperatur 25 °C sebesar 0 volt.



e. Karbon monoksida (CO)

Sifat fisika karbon monoksida (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 28,01 gr/mol
- Titik didih : -108,6 °C

- Titik leleh : 46,3⁰C

Sifat kimia karbon monoksida sebagai berikut :

- Karbon monoksida bereaksi dengan hidrogen menghasilkan gas metana



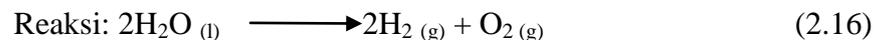
f. Oksigen (O₂)

Sifat fisika oksigen (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 16 gr/mol
- Temperatur kritis : -118⁰C
- Tekanan kritis : 49,7 atm
- Titik didih : -183⁰C
- Titik beku : -218,4⁰C
- Densitas : 1,43 x 10⁻³ gr/ml

Sifat kimia oksigen (Achmad, 1992) sebagai berikut :

- Oksigen (O₂) diperoleh dengan cara elektrolisis



- Oksigen bereaksi dengan alkana menghasilkan gas karbondioksida dan uap air (pembakaran sempurna).



g. Hidrogen sulfida (H₂S)

Sifat fisika hidrogen sulfida (Perry, 1997) sebagai berikut :

- Berat molekul : 34,08 gram/mol
- Titik didih : -59,6 °C
- Titik leleh : -82,9 °C

Sifat kimia hidrogen sulfida (Vogel, 1985) adalah :

- Merupakan reduktor dalam reaksi redoks
- Reaksi antara H₂S dengan HNO₃ membentuk endapan belerang dan gas

NO serta H₂O



2.1.6. Problem Biogas

Problem yang muncul ketika biogas baru diproduksi adalah komposisi biogas itu sendiri karena biogas mengandung beberapa gas lain yang tidak menguntungkan. Untuk mendapatkan hasil pembakaran yang optimal perlu dilakukan proses pemurnian/penyaringan. Beberapa gas yang tidak menguntungkan antara lain :

1) Gas Karbon dioksida (CO_2)

Gas CO_2 dalam biogas perlu dihilangkan karena gas tersebut dapat mengurangi nilai kalor pembakaran biogas. Selain itu, kandungan gas karbon dioksida (CO_2) dalam biogas cukup besar yaitu sekitar 30 – 45 % sehingga nilai kalor pembakaran biogas akan berkurang cukup besar. Nilai kalor pembakaran gas metana murni pada tekanan 1 atm dan temperatur $15,5^\circ\text{C}$ yaitu 9100 Kkal/m^3 (12.740 Kkal/kg). Sedangkan nilai kalor pembakaran biogas sekitar $4.800 - 6.900 \text{ Kkal/m}^3$ ($6.720 - 9660 \text{ Kkal/kg}$) (Harasimowicz dkk., 2007).

2) Gas Hidrogen Sulfida (H_2S)

Menurut Lastella dkk. (2002), konsentrasi gas ini dalam biogas relatif kecil $\pm 0,1 - 2\%$. Gas ini bersifat korosif sehingga konsentrasi yang besar dalam biogas dapat menyebabkan korosi pada ruang pembakaran. Selain itu, gas ini mempunyai bau yang tidak sedap, bersifat racun dan hasil pembakarannya menghasilkan gas sulfur dioksida (SO_2).

2.1.7. Manfaat Biogas dalam Kehidupan

Manfaat pembuatan biogas dari kotoran ternak antara lain :

1. Gas yang dihasilkan dapat mengganti *fuel* seperti LPG atau natural gas, dimana $1,7 \text{ m}^3$ biogas setara dengan 1 liter *gasoline*. Pupuk sapi yang dihasilkan dari satu sapi dalam satu tahun dapat dikonversi menjadi gas metana yang setara dengan lebih dari 200 liter *gasoline*
2. Gas yang dihasilkan dapat digunakan untuk sumber energi menyalakan lampu, dimana 1 m^3 biogas dapat digunakan untuk menyalakan lampu 60

Watt selama 7 jam. Hal ini berarti bahwa 1 m^3 biogas menghasilkan energi = $60\text{ W} \times 7\text{ jam} = 420\text{ Wh} = 0,42\text{ kWh}$

3. Limbah digester biogas, baik yang padat maupun cair dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik.

- Limbah padat digunakan untuk pupuk. Pupuk yang dihasilkan baik karena mengandung unsur hara yang tinggi selain itu dapat memperbaiki fungsi struktur tanah.
- Limbah cair digunakan untuk menyiram tanaman karena mengandung unsur hara yang dibutuhkan tanaman.

2.2. Teknologi Membran

2.2.1 Pengertian Membran

Membran merupakan alat pemisah yang memisahkan dua fase sebagai transportasi pembatas selektivitas berbagai campuran kimia. Campuran tersebut dapat bersifat homogen atau heterogen, berstruktur simetrik atau asimetrik, padatan atau cairan, memiliki muatan positif atau negatif, dan bersifat polar atau netral. Transportasi pada membran terjadi karena adanya *driving force* yang dapat berupa konveksi atau difusi dari masing-masing molekul, adanya tarik menarik antar muatan komponen atau konsentrasi larutan, dan perbedaan suhu atau tekanan. Membran mempunyai ketebalan yang bervariasi dari $100\mu\text{m}$ sampai beberapa milimeter (Pabby dkk., 2009).

2.2.2 Klasifikasi Membran

Menurut Mulder (1996), klasifikasi membran berdasarkan strukturnya dibagi menjadi 2 yaitu:

1. Membran berpori (*porous membrane*)

Prinsip pemisahan membran berpori didasarkan pada perbedaan ukuran partikel dengan ukuran pori membran. Ukuran pori membran memegang peranan penting dalam pemisahan. Membran dengan jenis ini biasanya digunakan untuk :

- Mikrofiltrasi (melewatkan air, menahan mikroba)
 - Ultrafiltrasi (melewatkan air menahan garam mineral)
2. Membran non pori (*non-porous membrane*)
- Pada membran tidak berpori ini prinsip pemisahannya didasarkan pada perbedaan kelarutan dan kemampuan berdifusi. Sifat intrinsik polimer membran mempengaruhi tingkat selektivitas dan permeabilitas. Membran dengan jenis ini digunakan untuk proses :
- Permeasi Gas
 - Pervaporasi
 - Dialisis

2.2.3 Material Membran

Menurut Mulder (1996), material membran dapat diklasifikasikan menjadi 3 antara lain :

1. Organik (Polimer)

Jenis polimer yang dapat dijadikan sebagai material membran yaitu :

- Membran berpori (porous membrane)

Contoh material : *polycarbonate, polyamide, polysulfone, cellulose ester, polyvinylidene fluoride, polytetrafluoroethylene*, dll.

Material membran dapat digunakan untuk aplikasi mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi.

- Membran tidak berpori (non-porous membrane)

Contoh material : *polyoxadiazoles, polytriazole*.

Material ini bisa digunakan untuk aplikasi separasi gas dan uap dan pervaporasi.

2. Anorganik

Tipe material anorganik membran ada 4 yaitu :

- Membran keramik

merupakan kombinasi dari logam (*aluminium, titanium, silicium* atau *zirconium*) dan non-logam (*oxide, nitride* atau *carbide*).

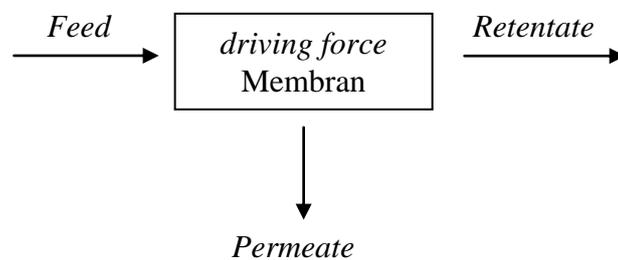
- membran gelas
berupa silikon oksida / silika (SiO₂)
- membran logam (termasuk karbon)
- membran *zeolite*

3. Biologi

Merupakan material membran yang berasal dari makhluk hidup misalnya lipida (*phospholipid*). Struktur membran dari material ini sangat kompleks. Tiap molekul lipid terdapat bagian yang hidrofilik dan hidrofobik.

2.2.4 Teori Pemisahan dengan Membran

Pemisahan dengan membran dilakukan dengan mengalirkan *feed* ke dalam membran kemudian akan terpisah sesuai *driving force* yang digunakan. Proses pemisahan dengan membran menghasilkan dua aliran yaitu *permeate* dan *retentate*. *Permeate* merupakan hasil pemisahan yang diinginkan sedangkan *retentate* merupakan hasil sisa (Pabby dkk., 2009).



Kinerja membran dapat dilihat dari besarnya selektivitas yang dihasilkan. Persamaan yang digunakan yaitu:

$$\alpha_{A/B} = \frac{y_A / y_B}{x_A / x_B} \quad (2.19)$$

dimana, A dan B merupakan komponen - komponen yang terdapat pada campuran yang akan dipisahkan (Cao dkk., 2002).

2.2.5 Kinerja Membran

Menurut Mulder (1996), *driving force* pada pemisahan menggunakan membran ada 4 macam. Kinerja (*performance*) instalasi membran tergantung pada jenis *driving force* yang digunakan. Macam – macam aplikasi pemisahan dengan membran berdasarkan *driving force* dan kinerja instalasinya antara lain:

1. *Driving force* gradien tekanan (ΔP)

Menurut Mulder (1996), aplikasi penggunaan antara lain : mikrofiltrasi, ultrafiltrasi, nanofiltrasi, *reverse osmosis*.

Kinerja instalasi membran berupa fluks (J) dan rejeksi (R) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J_v = \frac{Q_p}{A_m} \quad (2.20)$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.21)$$

Dimana :

J_v = volume fluks (liter/m².sec) R = rejeksi / retensi (span = 0–1)

Q_p = laju alir *permeate* (liter/sec) C_p = konsentrasi *permeate*

A_m = luas permukaan membran (m²) C_f = konsentrasi umpan

Besarnya fluks dihitung dari besarnya laju alir yang melewati setiap luas permukaan membran. Semakin besar laju alir *permeate* dan semakin kecil luas permukaan membran maka fluks yang dihasilkan semakin besar. Rejeksi merupakan ukuran perbandingan konsentrasi *permeate* dan *retentate* yang berhasil dipisahkan.

2. *Driving force* gradien Konsentrasi (ΔC)

Aplikasi penggunaan : pervaporasi, permeasi gas, permeasi uap, dialisis, dialisis – difusi. Menurut Cao dkk. (2002), kinerja (*performance*) instalasi pada pemisahan gas berupa fluks (J) dan selektivitas (α) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$J_v = \frac{Q_p}{A_m} \quad (2.22)$$

$$\alpha_{A/B} = \frac{P/l_A}{P/l_B} \quad (2.23)$$

$$P/l = \frac{Q_p}{A_m \cdot \Delta P} = \frac{Q_p}{n \pi D l \Delta P} \quad (2.24)$$

Dimana : J_v = volume fluks (liter/m².sec)

Q_p = laju alir *permeate* (liter/sec atau cm³/sec)

A_m = luas permukaan membran (m² atau cm²)

$\alpha_{A/B}$ = selektivitas zat A terhadap zat B

(P/l) = *permeance* (1 GPU = 1×10.6 cm³ (STP)/(cm² s cmHg))

ΔP = beda tekanan (cmHg)

n = jumlah fiber dalam modul

l = panjang *hollow fiber* (m atau cm)

D = diameter *hollow fiber* (m atau cm)

Selektivitas merupakan perbandingan antara permeabilitas zat A terhadap zat B. Permeabilitas merupakan kinerja membran yang dihitung dengan besarnya fluks dibagi *driving force* berupa beda tekanan.

3. *Driving force* gradien Temperatur (ΔT)

Menurut Mulder (1996), aplikasi penggunaan: *thermo-osmosis*, distilasi membran. *Performance* instalasi berupa fluks (J) dan selektivitas (α).

4. *Driving force* gradien Potensial Listrik (ΔE)

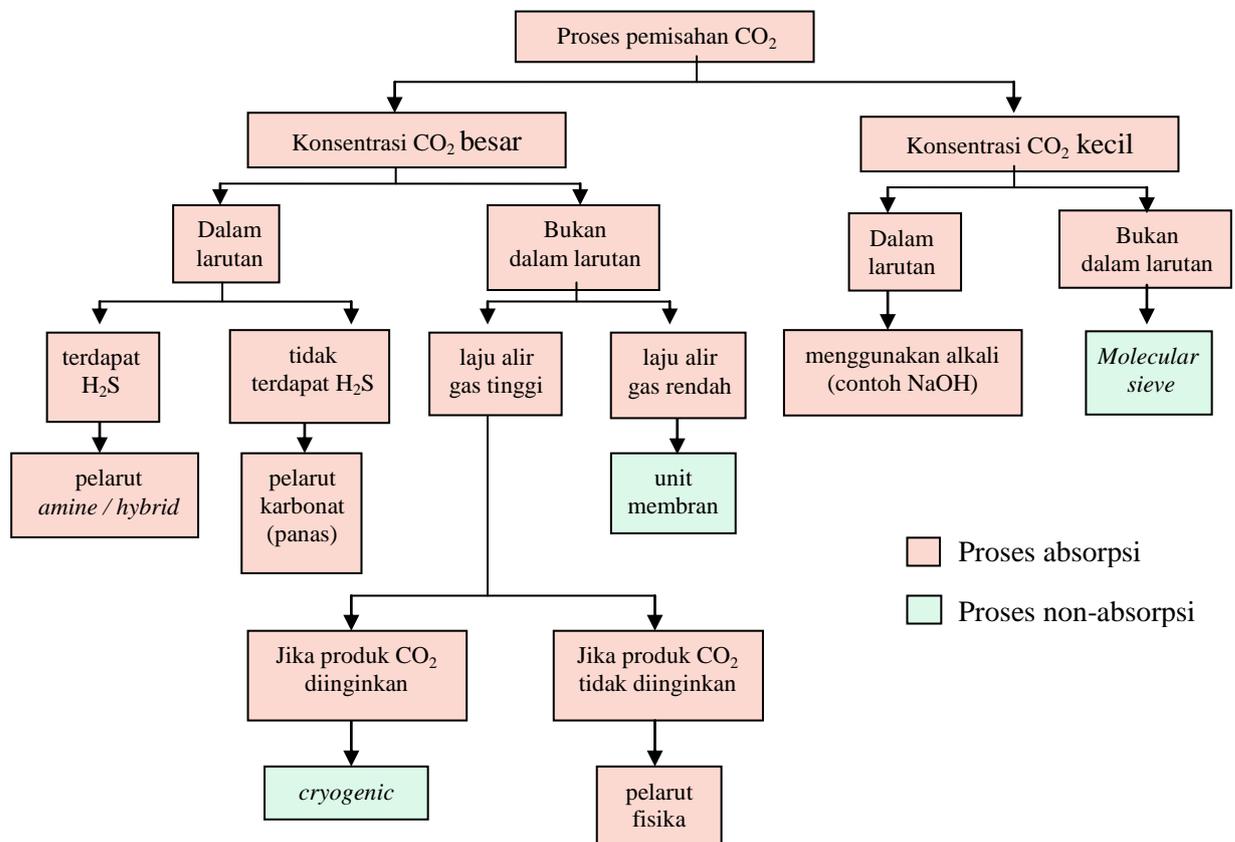
Menurut Mulder (1996), aplikasi penggunaan : elektrodialisis, elektro-osmosis, membran-elektrolisis. Kinerja (*performance*) instalasi berupa fluks (J) dan selektivitas (α).

2.3. Pemurnian Biogas dengan Teknologi Membran

2.3.1 Teknologi Pemurnian Biogas

Menurut Lastella dkk. (2002), penggunaan teknologi pemurnian biogas tergantung pada komposisi biogas dan tujuan penggunaannya. Menurut Pabby dkk. (2009), komposisi biogas tergantung pada sumber bahan bakunya. Proses

pemurnian biogas menggunakan membran sangat baik pada tekanan operasi 5–7 bar. Menurut Noverri (2007), pemilihan metoda yang cocok untuk pemisahan CO₂ dari campurannya tergantung pada beberapa parameter, yaitu : konsentrasi CO₂ di aliran umpan, sifat alami komponen umpan, tekanan dan temperatur. Menurut Kapdi dkk. (2005), metode pemurnian biogas (*CO₂ removal*) ada beberapa, antara lain: absorpsi fisika, absorpsi kimia, adsorpsi, pemisahan dengan membran, *cryogenic* dan konversi kimia menjadi senyawa lain. Pemilihan proses pemisahan CO₂ dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini



Gambar 2.1 Skema teknologi pemisahan gas CO₂ (Noverri, 2007)

2.3.2 Permeasi Gas

Menurut Mulder (1996) dan Pabby dkk. (2009), membran yang dapat digunakan untuk pemisahan gas ada 2 tipe yaitu membran berpori (*porous membrane*) dan membran tidak berpori (*non-porous membrane*).

- Permeasi gas pada membran berpori (*porous membrane*)

Mekanisme perpindahan yang dapat terjadi pada permeasi gas di sepanjang membran berpori, antara lain :

a. Poiseulle / *viscous flow*

Ketika gas berpindah di dalam membran secara *viscous flow* (contoh pada mikrofiltrasi), perpindahan yang terjadi tergantung pada ukuran pori membran dan *mean free path of gas molecule*.

Persamaan *mean free path of gas molecule* yaitu :

$$\lambda = \frac{R_o T}{2^{0.5} \pi p N d_m^2} \quad (2.25)$$

Dimana :

R_o = konstanta gas ideal (0,082 liter.atm/mol.K)

T = temperatur (K)

p = tekanan (atm)

N = konstanta avogadro ($6,022 \times 10^{23}$ partikel / mol)

d_m = diameter molekul (dm)

b. *Knudsen diffusion*

Mekanisme perpindahan jenis ini sama dengan *viscous flow*. Akan tetapi, penurunan diameter pori membran, maka *mean free path of gas molecule* bisa menjadi lebih besar daripada diameter pori. Mekanisme ini tergantung pada rasio akar kuadrat dari berat molekul penetran. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme ini dapat menghasilkan pemisahan yang tinggi apabila operasi terjadi secara *cascade*.

Mekanisme jenis ini biasanya digunakan untuk pemisahan gas. Menurut Pabby dkk. (2009), *knudsen diffusion* terjadi pada membran anorganik

microporous atau disepanjang pori kecil dalam *dense polymer membrane* atau dapat juga terjadi pada *mixed matrix membrane*.

Mekanisme ini terjadi pada $D_p > 20 \overset{\circ}{\text{Å}}$, sehingga persamaan koefisien *knudsen diffusion* menjadi :

$$D_{Kn} = \frac{d_p}{3} \bar{v}_A = \frac{d_p}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_A}} = 48,5 d_p \sqrt{\frac{T}{M_A}} \quad (2.26)$$

Dimana :

d_p = diameter pori (m)

v_A = rata-rata laju molekul (m/s)

M_A = berat molekul gas (gram/mol)

T = temperatur (K)

Mekanisme menjadi signifikan apabila $d_p \sim 5 \overset{\circ}{\text{Å}}$.

c. *Slip flow*

Merupakan mekanisme *intermediate* antara *viscous flow* dan *knudsen diffusion*.

d. *Sieving action*

Mekanisme ini sering digunakan pada proses adsorpsi dan reaksi. Contoh mekanisme ini yaitu penggunaan *zeolite* dimana selektivitas berhubungan dengan ukuran molekul gas. Menurut Pabby dkk. (2009), mekanisme ini terjadi pada $d_p = 3 - 5 \overset{\circ}{\text{Å}}$.

e. *Surface diffusion*

Mekanisme ini disebabkan oleh absorpsi/adsorpsi (sorpsi) gas di dalam permukaan membran serta difusi gas yang terabsorpsi/teradsorpsi (*sorbed*) disepanjang pori membran. Mekanisme ini biasanya untuk pemisahan gas. Mekanisme ini tergantung pada sifat kimia gas dan permukaan membran.

- Permeasi gas pada membran tidak berpori (*non-porous membrane*)

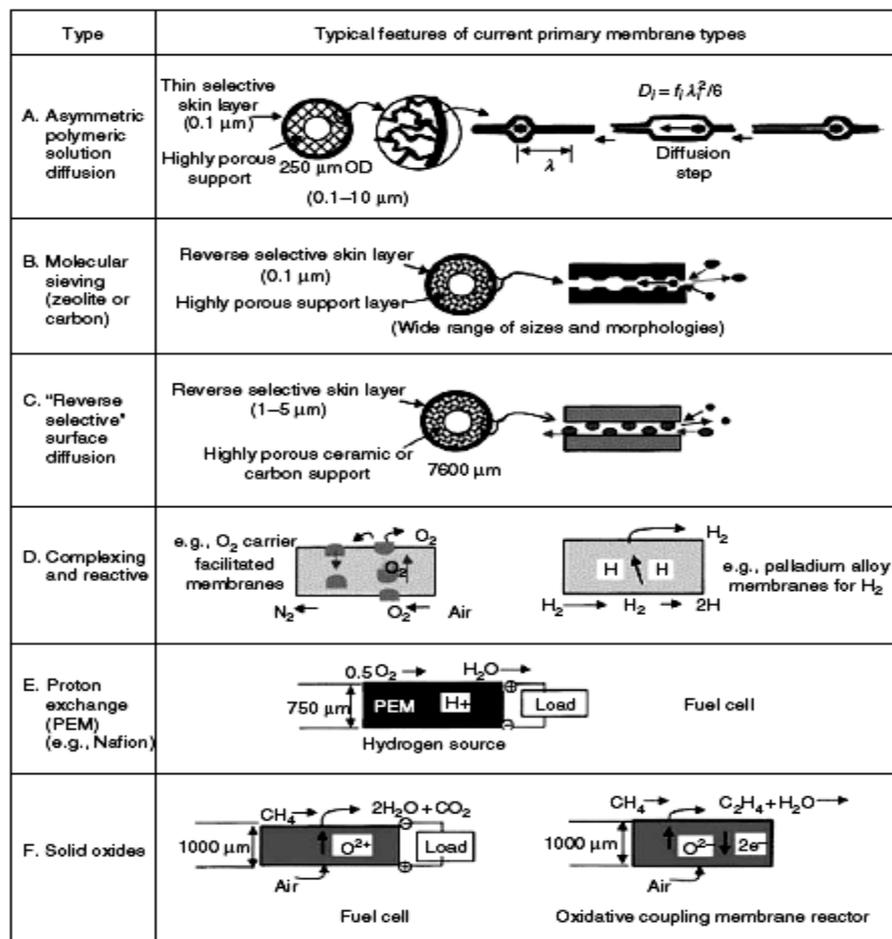
Mekanisme perpindahan yang biasa terjadi pada permeasi gas di sepanjang membran tidak berpori (*non-porous membrane*) yaitu mekanisme *solution-*

diffusion. Mekanisme ini tergantung pada perbedaan permeabilitas dari bermacam-macam gas disepanjang membran. Menurut Pabby dkk. (2009), pada Gambar 2.2 dijelaskan bahwa mekanisme ini terjadi pada *dense polymer membrane*. Permeabilitas tergantung pada sifat fisika gas yang akan dipisahkan dan kestabilan polimer (*glassy* atau *rubbery*). Permeabilitas dan selektivitas gas CO₂/CH₄ ditunjukkan pada Tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.5 Permeabilitas (P) dan selektivitas (α) gas CO₂/CH₄
(Pabby dkk., 2009)

Polimer	T(°C)	P _{CO₂} (Barrer)	$\alpha_{\text{CO}_2/\text{CH}_4}$
PDMS (<i>silicon Rubber</i>)	35	4550	3,37
PC (<i>Polycarbonate</i>)	35	6,5	23,2

Keterangan : 1Barrer = 1×10^{-10} cm³ (STP)-cm/cm² s cmHg.



Gambar 2.2 Mekanisme perpindahan pada *microporous membrane*
(Pabby dkk., 2009)

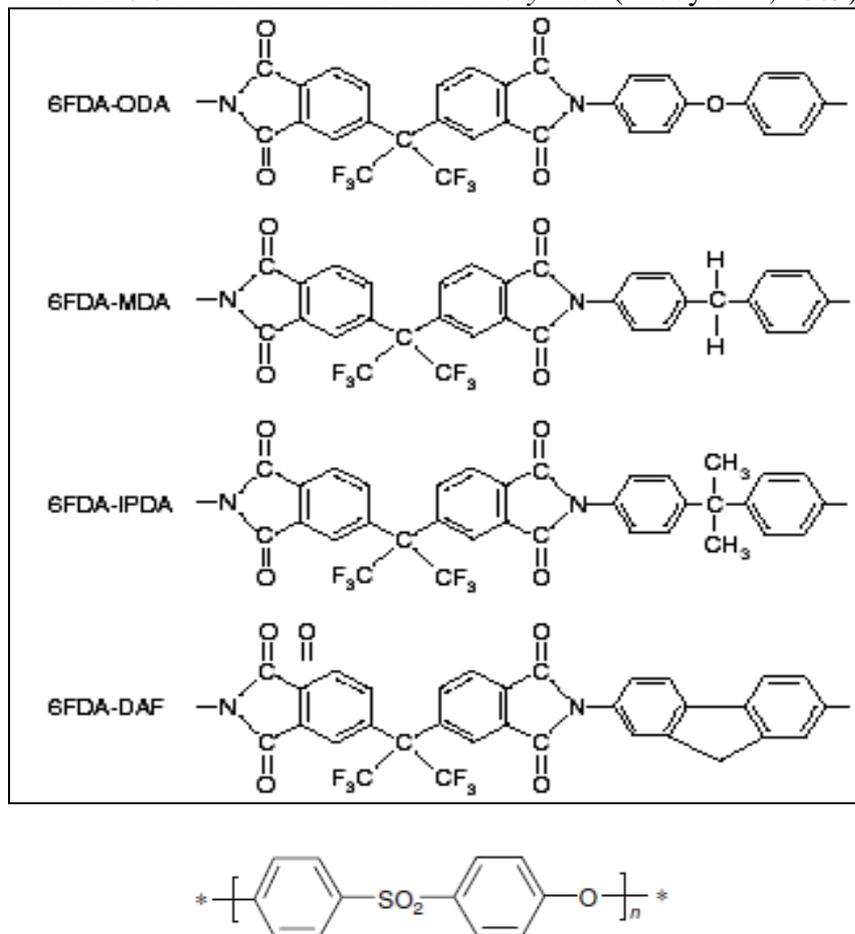
2.3.3 Dasar Pemilihan Membran untuk Pemurnian Biogas

Menurut Pabby dkk. (2009), material membran yang memiliki selektivitas tinggi untuk pemurnian biogas adalah polimer (seperti *cardopolymers*), *carbon molecular sieves*, *mixed matrix* dan *biomimetic*. Material membran yang bisa digunakan untuk pemurnian biogas antara lain:

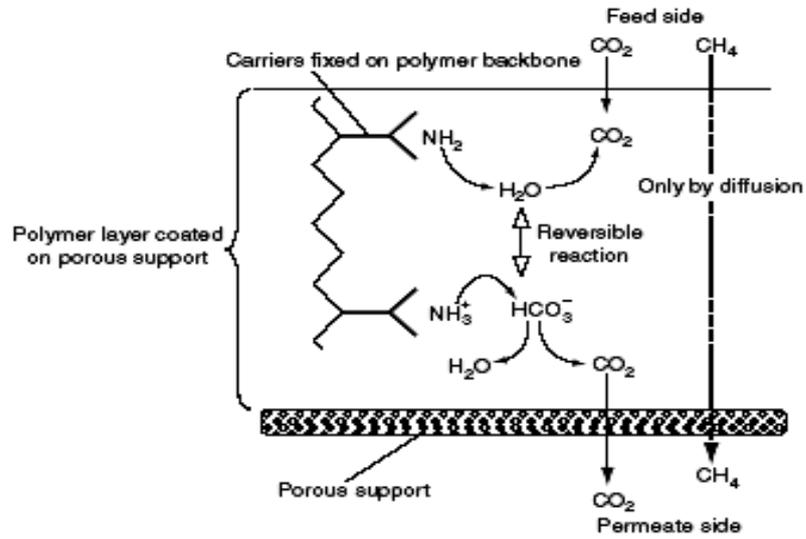
1. Membran Polimer

Polimer merupakan material membran yang banyak digunakan untuk pemisahan gas. Membran dari polimer dapat berupa membran komposit dengan *selective skin layer* ataupun membran *asymmetric hollow fiber*. Salah satu membran polimer. Struktur kimia berbagai jenis membran polimide ditunjukkan pada Tabel 2.6 dibawah ini

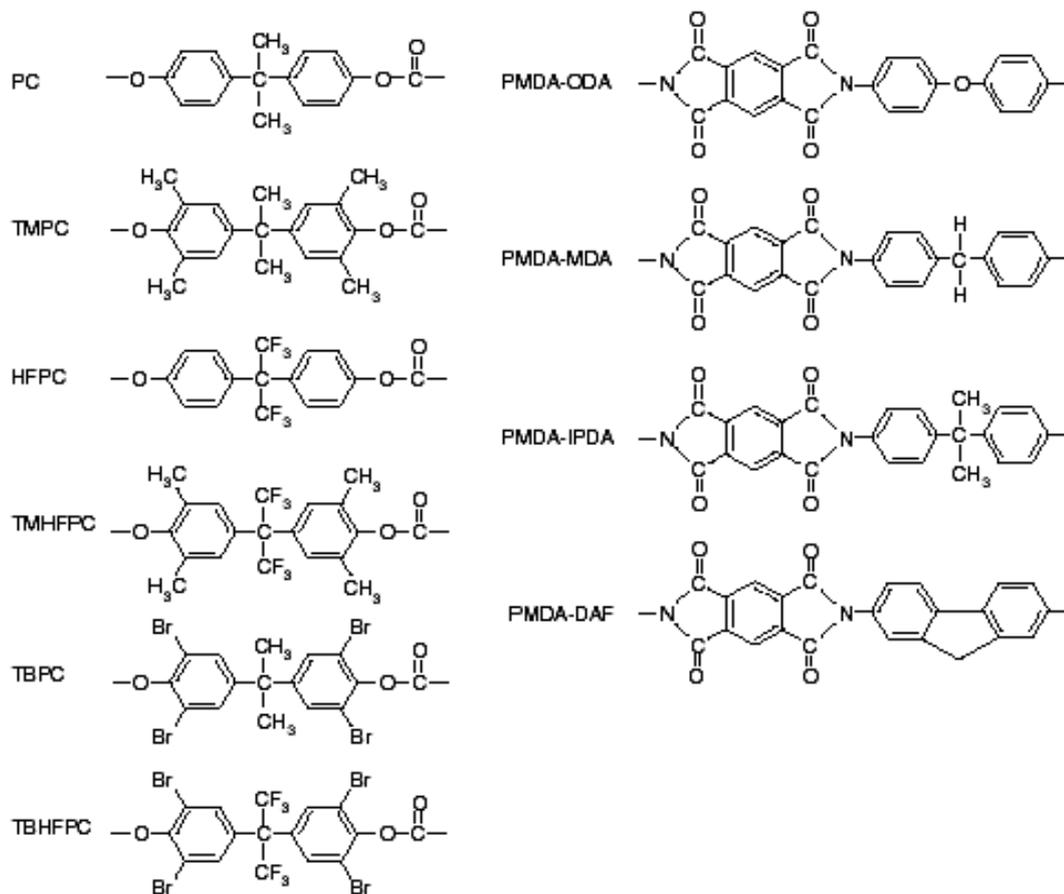
Tabel 2.6 Struktur Kimia Membran *Polimide* (Pabby dkk., 2009)



Gambar 2.3 Struktur kimia *polyethersulfone* (Pabby dkk., 2009)



Gambar 2.4 Mekanisme transportasi CO₂ pada membran (Pabby dkk., 2009)



Gambar 2.5 Struktur Kimia Membran Polycarbonate (Pabby dkk., 2009)

Permeabilitas dan selektivitas berbagai jenis membran *polycarbonate* dan *polymide* pada tekanan 2 atm dan 10 atm ditunjukkan pada Tabel 2.7 dibawah ini

Tabel 2.7 Permeabilitas dan Selektivitas Membran *Polycarbonate* dan *Polymide* (Pabby dkk., 2009)

Polymer	Permeabilities at 35°C (Barrer)			Ideal Selectivities at 35°C		
	He 10 atm	O ₂ 2 atm	CO ₂ 10 atm	He/CH ₄ 10 atm	O ₂ /N ₂ 2 atm	CO ₂ /CH ₄ 10 atm
Polycarbonates						
PC	13	1.6	6.8	35	4.8	19
TMPC	46	5.6	18.6	50	5.1	21
HFPC	60	6.9	24	57	4.1	23
TMHFPC	206	32	111	44	4.1	24
TBPC	18	1.4	4.2	140	7.5	34
TBHFPC	100	9.7	32	112	5.4	36
TB/TBHF-co-PC	49	4.9	16	110	6.2	34
Polyimides						
PMDA-ODA	8.0	0.61	2.71	134.9	6.1	45.9
PMDA-MDA	9.4	0.98	4.03	94	4.9	42.9
PMDA-IPDA	37.1	7.1	26.8	41.1	4.7	29.7
PMDA-DAF	1.9	—	0.15	921	—	71.6
6FDA-ODA	51.5	4.34	23	135.4	5.2	60.5
6FDA-MDA	50	4.6	19.3	117.1	5.7	44.9
6FDA-IPDA	71.2	7.53	30	102.1	5.6	42.9
6FDA-DAF	98.5	7.85	32.2	156.3	6.2	51.1

2. Membran *Carbon Molecular Sieving* (CMS)

Membran ini merupakan membran karbon *microporous*. Mekanisme perpindahan yang terjadi pada membran ini ada 3 kemungkinan, yaitu *molecular sieving* ($d_p < 5 \text{ \AA}$), *selective surface* ($5 \text{ \AA} < d_p < 12 \text{ \AA}$) dan *knudsen diffusion* ($d_p > 20 \text{ \AA}$). Dalam pemisahan membran modul yang biasa digunakan yaitu *hollow fiber* atau *sheet* (lembaran). Pada pemurnian biogas (CO₂/CH₄), penggunaan membran ini menghasilkan selektivitas yang tinggi jika mekanisme perpindahannya berupa SSF (*selective surface flow*) (Pabby dkk., 2009).

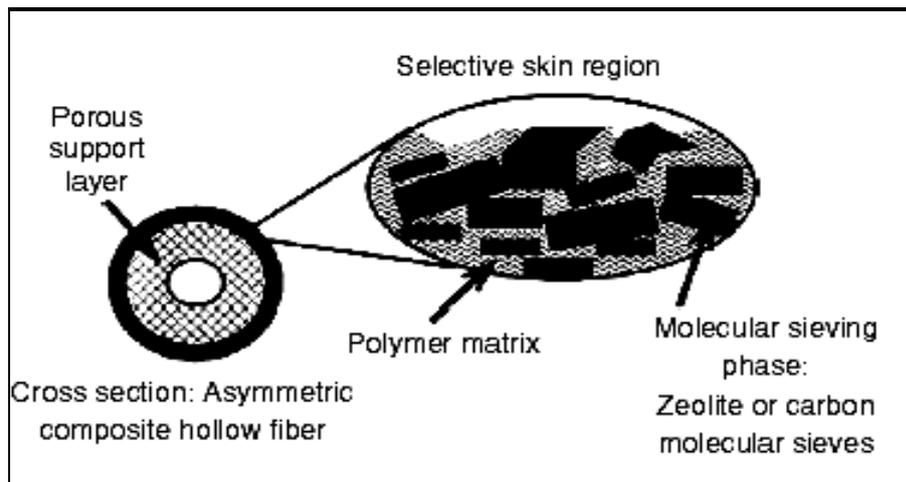
3. *Mixed Matrix Membrane* / MMM (*Nanocomposites*)

Membran ini terdiri dari polimer dimana material *non-porous* atau anorganik *dense* seperti partikel *silika*, *zeolite*, *carbon* (disebut *nanotube*)

didispersikan. Mekanisme yang terjadi pada membran ini yaitu *solution diffusion* dan dikombinasi dengan *surface diffusion / molecular sieving*.

Menurut Pabby dkk. (2009), aplikasi *mixed matrix membrane* pada pemurnian biogas, misalnya :

- Polimer dengan CMS (*Carbon Molecular Sieves*)
- Polimer dengan *Nonporous Nanoparticles*



Gambar 2.6 *Mixed Matrix Membranes* (Pabby dkk., 2009)

4. Membran Anorganik

Membran ini dapat berupa simetrik maupun asimetrik. Membran simetrik memiliki struktur homogen, contohnya membran *alumina anodized* dan membran *capillary glass*. Membran anorganik yang sering digunakan adalah membran asimetrik dengan struktur komposit, contoh membran *ceramic alumina* dan membran *carbon-zirconia* (Pabby dkk., 2009).

2.3.4 Dasar Pemilihan Modul untuk Pemurnian Biogas

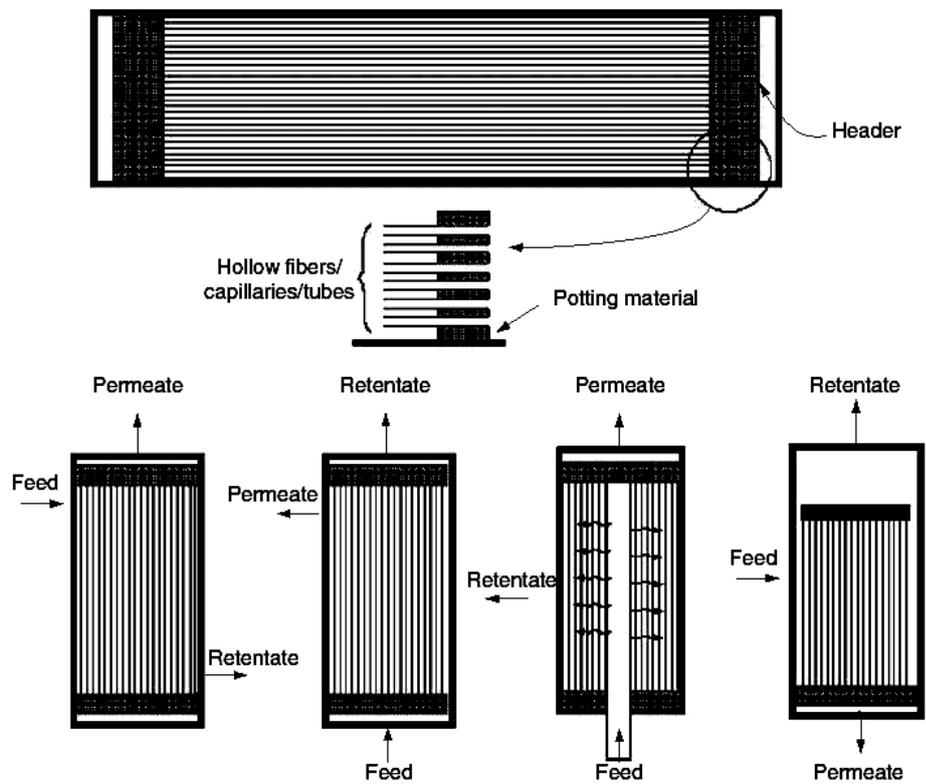
Menurut Pabby dkk. (2009), modul membran yang bisa digunakan untuk pemurnian gas antara lain:

1. *Hollow Fiber*

Modul ini merupakan susunan ikatan – ikatan fiber dengan diameter 0,1-2,0 mm yang tersusun dalam sebuah pipa. Modul ini efektif untuk pemisahan dengan luas permukaan besar untuk volume yang kecil.



Gambar 2.7 Modul membran *Hollowfiber* (Coulson and Richardson, 2002)



Gambar 2.8 Modul membran *Hollow Fiber* (Pabby dkk., 2009)

2. *Spiral Wound*

Modul ini terdiri dari beberapa lembaran datar tergulung spiral. Modul ini berdiameter 0,1 m, panjang 0,9 m dan luas permukaan sebesar 5 m².

2.4. Pemurnian Biogas Berdasarkan Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Ismaila dkk (1998) bertujuan untuk memproduksi membran asimetrik *hollow fiber polysulfone* dengan metode *dry/wet spinning* untuk diujikan pada permeasi gas CO_2/CH_4 . Kondisi operasi normal untuk memurnikan biogas (CO_2/CH_4) yaitu temperatur 25°C dan tekanan 5,1 atm.

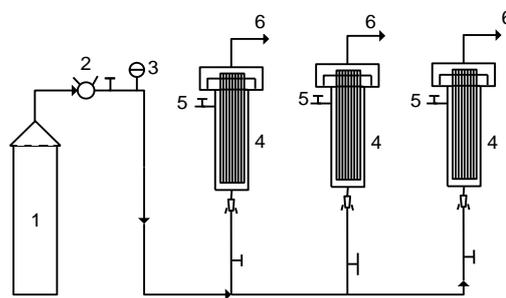
Hasil penelitian yang dilakukan oleh Lin dkk. (2001) pada Tabel 2.8 menunjukkan bahwa faktor- faktor yang berpengaruh pada penggunaan membran *dense flat films polyimide 6 FDA- Durene* untuk pemisahan gas (termasuk pemisahan CO_2/CH_4) antara lain :

- Tekanan (pada range 2 – 10 atm)
Semakin tinggi tekanan maka permeabilitas gas semakin menurun.
- Temperatur (pada range 29 – 50°C)
Semakin tinggi temperatur operasi yang digunakan maka permeabilitas semakin meningkat.
- Waktu (280 hari)
Semakin lama waktu proses permeasi gas maka semakin tinggi permeabilitas.
- Ukuran molekul gas yang dipisahkan
Semakin besar ukuran molekul gas (diameter molekul) maka permeabilitas semakin meningkat.

Tabel 2.8 *Performance* membran *dense flat films polyimide 6 FDA- Durene* untuk pemurnian biogas (Lin dkk., 2001)

Tekanan (atm) pada $T=35^\circ\text{C}$	Permeabilitas (barrer)		Selektivitas CO_2/CH_4
	CO_2	CH_4	
2,0	677,8	33,7	20,18
3,5	599,5	32,4	18,51
5,0	546,8	31,7	17,27
7,0	501,1	29,6	16,95
10,0	455,8	28,4	16,05

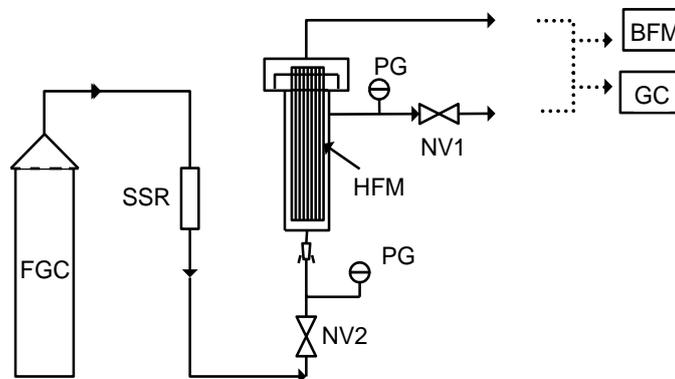
Penelitian yang dilakukan oleh Cao dkk (2002) yaitu memproduksi membran asimetrik *hollow fiber polyimide 6FDA-2,6-DAT* untuk diujikan pada pemurnian biogas (CO_2/CH_4). Membran asimetrik *hollow fiber polyimide 6FDA-2,6-DAT* (*poly(2,6-toluene-2,2-bis(3,4-dicarboxyphenyl) hexafluoropropane diimide)*) mempunyai *performance* yang tinggi untuk pemisahan gas CO_2/CH_4 . Modul yang paling sesuai untuk pemisahan gas adalah *hollow fiber* karena modul ini memiliki luas permukaan yang besar.



Gambar 2.11 Skema Rangkaian Alat Permeasi Biogas (Cao dkk., 2002)

Keterangan :

1. Tabung gas (berisi umpan biogas yang akan dimurnikan)
2. Pressure Regulator (Regulator Tekanan)
3. Pressure Gauge (alat pengukur tekanan tolok)
4. Modul Membran *Hollow Fiber*
5. Purge Gas (Pembuangan gas)
6. *Permeate* Gas (hasil permeasi gas)



Gambar 2.12 Instrumentasi alat permeasi biogas (Cao dkk., 2002)

Keterangan :

- BFM = *Bubble Flow Meter* (alat ukur laju alir gas)
- FGC = *Feed Gas Cylinder* (tabung gas umpan)
- GC = *Gas Chromatograph* (alat penentu komposisi gas)
- HFM = *Hollow Fiber Module* (Modul membran jenis *hollow fiber*)
- NV = *Needle Valve* (bukaan kran)
- SSR = *Single Stage Regulator* (alat ukur tekanan)
- PG = *Pressure Gauge* (meter / penunjuk tekanan)

Hasil penelitian Cao dkk. (2002) pada Tabel 2.9 menunjukkan bahwa membran asimetrik *hollow fiber polyimide 6FDA-2,6-DAT* mempunyai tendensi yang kuat apabila digunakan untuk pemisahan biogas pada kondisi *steady state*. Sedangkan pada pengujian pemisahan gas untuk gas campuran (CO_2 dan CH_4), selektivitas dan *permeance* gas tidak terlalu tinggi. Perbedaan *performance* membran ini dipengaruhi oleh CO_2 dimana terdapat *induces plasticization*.

Tabel 2.9 Hasil Penelitian (Cao dkk., 2002)

No.	Sistem Uji	Kondisi Operasi		Permeance (GPU)		Selektivitas (α)
		T ($^{\circ}\text{C}$)	P (atm)	CO_2	CH_4	CO_2/CH_4
1.	<u>Biogas</u>					
	Mula-mula (1,5 jam)	23	13,6	300	4,60	65
	Setelah 185 hari	23	13,6	76	1,21	63
2.	<u>Campuran gas</u>					
	Mula-mula (1,5 jam)	18	13,6	59	1,46	40

Penelitian yang dilakukan oleh Harasimowicz dkk. (2007) bertujuan untuk memurnikan biogas dari gas CO_2 menggunakan membran *polyimide*. Hasil penelitian Harasimowicz dkk. (2007) pada Tabel 2.10 menunjukkan besarnya kandungan konsentrasi awal CH_4 dalam biogas dari 55-85% meningkat menjadi 91 - 94,4%. Pemurnian CH_4 dengan menggunakan membran *polyimide* dapat dilakukan dengan proses satu *stage*. Mekanisme perpindahan yang terjadi berupa *molecular sieving*.

Tabel 2.10 *Performance* membran polimer untuk pemurnian biogas
(Harasimowicz dkk., 2007)

Polimer	Permeabilitas (barrer)		Selektivitas CO ₂ /CH ₄
	CO ₂	CH ₄	
<i>Poly(4-methyl,1-penten)</i>	84,60	14,90	5,68
<i>Polymide TMPA-6FDA</i>	440,00	28,20	15,60
<i>PPO</i>	65,50	4,10	16,00
<i>Polysulphone</i>	4,90	0,21	23,30
<i>Tri-bromodi-phenylopolycarbonate A</i>	4,23	0,12	33,60

Variabel yang digunakan dalam penelitian Harasimowicz dkk (2007) yaitu:

- Variabel tetap : Komposisi biogas dan laju alir umpan (Q_F)
- Variabel terikat : Permeabilitas (P/l) dan selektivitas (α)
- Variabel bebas :
 1. Tekanan umpan (P_F) dengan *range* 2,96 – 9,87 atm
 2. Tekanan *retentate* (P_R) dengan *range* 2,76 – 9,77 atm
 3. Temperatur operasi (T) dengan *range* 20 - 50 °C

Menurut Chung dkk.(2007), pemisahan gas melalui membran polimer tidak berpori terjadi secara *solution diffusion*. Membran MMMs (*Mixed Matrix Membranes*) dapat digunakan untuk modul berbentuk *flat sheet asymmetric* dan *hollow fiber asymmetric*. Bahan campuran *mixed matrix membrane* merupakan campuran dari bahan polimer organik dan polimer anorganik. Pada Tabel 2.11 terdapat beberapa hasil penelitian penggunaan membran MMMs (*Mixed Matrix Membranes*), antara lain :

Tabel 2.11 Hasil Penelitian Beberapa Peneliti (Chung dkk., 2007)

Nama Peneliti	Material Utama		Permeabilitas CO ₂ (Barrer)	(α) CO ₂ /CH ₄
	Polimer	Filler		
J.M. Duval dkk. (1993)	<i>NBR</i>	<i>KY Zeolite (35% vol)</i>	8,00	35,0
D. Q. Vu dkk. (2003)	<i>Matrimid (PI)</i>	<i>CMS (36% wt)</i>	12,60	51,7
M. Anson dkk. (2003)	<i>ABS</i>	<i>CA (62,4% vol)</i>	6,67	50,0
Y. Li dkk (2005)	<i>PES</i>	<i>Zeolite-Perak (50% wt)</i>	1,20	44,0

Keterangan :

ABS = Acrylonitrile Butadiene Styrene

CMS = Carbon Molecular Sieves

CA = Cellulose Acetate

NBR = Nitrile Butadiene Rubbers

PES = Polyethersulfone

PI = Polyimide

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Liu dkk. (2008) pada Tabel 2.12 menunjukkan bahwa membran asimetrik *hollow fiber* yang dibuat dari bahan *cellulosa acetat (CA)* dapat digunakan untuk pemurnian biogas (CO₂/CH₄). *Mixed Matrix Membrane (MMM)* dapat digunakan untuk permeabilitas dan selektivitas yang tinggi secara *molecular sieves*. Penelitian yang dilakukan dilakukan pada kondisi operasi temperatur 50 °C dan tekanan 6,8 atm.

Tabel 2.12 *Performance Mixed Matrix Membrane (MMM)* Berbasis *cellulosa acetat (CA)* (Liu dkk., 2008)

Permeabilitas (barrer)		Selektivitas CO ₂ /CH ₄
CO ₂	CH ₄	
9,57	0,427	22,4

2.5 Hasil Penelitian Terdahulu Proses Pemisahan Gas dengan Membran Campuran Zeolite dengan Bahan Pengisi Polyethersulfone (PES)

Material *zeolite* mempunyai perhatian para peneliti baru – baru ini terutama dibidang composite material *organic – inorganic Mixed Matrix Membranes* (MMMs). Secara umum MMMs melibatkan dispersi dari *molecular sieve* sebagai kesatuan dalam fase polimer – matrik. Penyatuan 2 material yang berbeda ini menunjukkan peluang untuk mengkombinasikan sifat dari polimer dengan sifat pemisahan gas dari *molecular sieve rigid* (Kulprathipanja dkk., 1998). Bagaimanapun sifat dari material *composite* yang terbentuk, tidak hanya ditentukan dari salah satu komponen saja baik matrik ataupun polimernya, akan tetapi sifat antar permukaan (*interfacial*) antara material organik dengan inorganik (Mahajan dkk., 2002).

Pada preparasi membran MMMs *zeolite – PES* yang dibuat dengan menggunakan metode penuangan larutan (*casting solution*). Metode *casting film* ini sama dengan yang dikerjakan oleh Mahajan, 2000 kecuali pada treatment pendinginan. Pada saat pendinginan membrane dilakukan dengan meningkatkan temperatur dari 200 °C menjadi 250 °C dengan kenaikan 0,5 °C setiap menit, kemudian membiarkan lapisan film lebih dari semalam pada temperature 250 °C dibawah tekanan vakum. Kemudian langkah terakhir mengambil film dari oven dengan seketika dan membiarkan di udara terbuka.

Penelitian yang dilakukan Zhen dkk. (2005) yaitu pengujian permeasi gas yang dilakukan terhadap 2 variasi jenis membran yaitu PES murni dengan PES – *zeolite* M-A dan N-A pada 35 °C terhadap gas murni dari He, H₂, N₂, O₂, CO₂ dan CH₄. Perbedaan PES – *zeolite* M-A dengan PES – *zeolite* N-A yaitu hanya pada ukurannya, dengan jenis *zeolite* A.

Tabel 2.13 Hasil Permeabilitas Gas Melalui Membran PES dan PES – Zeolite 4A pada suhu 35 °C. (Zhen dkk., 2005)

Membran	Permeabilitas					
	He*	H ₂ *	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
PES	9.11	8.96	0.773	0.129	0.112	3.38
PES-N-A	10.4	8.3	0.583	0.0907	0.0743	2.32
E ^a	114.16 %	92.63 %	75.42 %	70.31 %	66.34 %	68.64 %
PES-M-A	5.23	4.94	0.363	0.058	0.0501	1.56
E ^a	57.41 %	55.13 %	46.96 %	44.96 %	44.73 %	46.15 %

*He dan H₂ diuji pada tekanan 2 atm dan gas yang lain pada tekanan 10 atm. Permeabilitas dinyatakan dalam satuan barrer.

1 barrer = 10⁻¹⁰ cm³(STP)cm/cm²cm Hg s.

^aE didefinisikan sebagai ratio atau perbandingan sifat MMMs terhadap ketebalan membran murni.

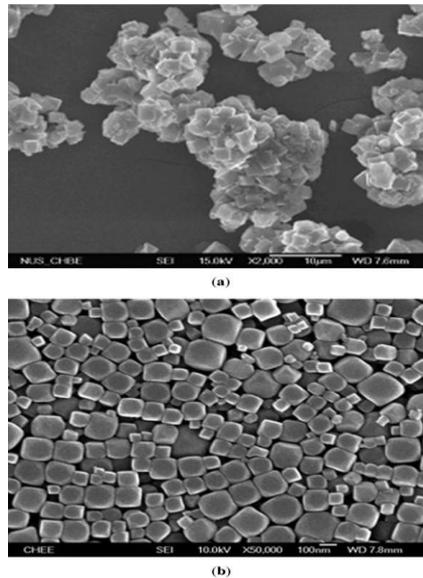
Tabel 2.14 Hasil Permselectifitas Gas Melalui Membran PES dan PES – Zeolite 4A pada suhu 35 °C. (Zhen dkk., 2005)

Membran	Permselectifitas					
	(P)He/(P)N ₂	(P)H ₂ /(P)N ₂	(P)O ₂ /(P)N ₂	(P)CO ₂ /(P)CH ₄	(P)H ₂ /(P)CO ₂	(P)He/(P)CO ₂
PES	70.62	69.46	5.99	30.18	2.65	2.70
PES-N-A	114.66	91.51	6.43	31.22	3.58	4.48
E ^a	162.37 %	131.75 %	107.27 %	103.47 %	134.96 %	166.32 %
PES-M-A	90.17	85.17	6.26	31.14	3.17	3.35
E ^a	127.69 %	122.63 %	104.45 %	103.18 %	119.46 %	124.39 %

Tabel 2.15 Ukuran Diameter Berbagai Jenis Molekul Gas
(Zhen dkk., 2005)

Diameter	Jenis Gas					
	He	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO ₂
Kinetic Diameter(Å)	2.60	2.89	3.46	3.64	3.80	3.30
Collision Diameter (Å)	2.58	2.92	3.43	3.68	3.82	4.00

Hasil penelitian yang dilakukan Zhen dkk. (2005) pada Tabel 2.15 dapat disimpulkan bahwa nanosize dan microsize partikel *zeolite* 4A dapat digunakan untuk membuat MMMs dengan menyatukan ke dalam PES. Dari Gambar 2.12 SEM dapat dilihat bahwa kedua *zeolite* (*Microsized dan Nanosized Zeolitee*) dapat kontak atau berinteraksi dengan baik dengan fase polimer.



Gambar 2.13 Hasil SEM (*Scanning Electron Microscope*)
polyetehersulfone – zeolite MMMs pada konsentrasi berat 20
% *zeolite*

Gambar (a) *Microsized zeolite* A, inset : perbesaran tinggi

Gambar (b) *Nanosized zeolite* A, inset : perbesaran tinggi

Pada eksperimen permeasi gas dengan MMMs terhadap 6 jenis gas yang terdapat pada Tabel 2.14 menunjukkan hasil bahwa selektifitas dari *zeolite* 4A/PES MMMs untuk pasangan gas He/N₂, H₂/N₂, He/CO₂, dan H₂/CO₂ terjadi peningkatan secara signifikan jika dibandingkan terhadap membran PES murni. Untuk permselektifitas gas terjadi peningkatan untuk nanostruktur membran PES, sebagai hasil yang terbentuk dari nanokristal *zeolite* 4A. Untuk hasil permeabilitas pada Tabel 2.13 dari *zeolite* 4A – PES MMMs untuk semua gas terjadi penurunan. Studi yang dilakukan Zhen dkk. (2005) untuk mempelajari sifat interaksi permukaan diantara polimer dengan *zeolite*, hal ini dilakukan dengan harapan dapat meningkatkan sifat dan karakteristik material PES – *zeolite* secara keseluruhan.

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang akan digunakan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu melakukan beberapa tahap percobaan. Tahap pertama adalah menganalisa komposisi awal yang terdapat dalam biogas untuk mengetahui konsentrasi awal gas CO₂ dan konsentrasi awal gas CH₄ yang ada dalam biogas. Tahap ini akan dilakukan di Laboratorium Analisa Gas. Tahap kedua adalah melakukan pengujian terhadap alat permeasi biogas yang telah dirangkai untuk mengetahui kinerja (*performance*) instalasi membran dalam memisahkan gas CO₂/CH₄. Tahap ini akan dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Limbah.. Variabel – variabel yang akan digunakan adalah temperatur operasi (T_{op}), tekanan umpan (P_F), tekanan *retentate* (P_R), dan jenis membran yang digunakan. Tahap ini akan dilakukan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Limbah.

3.1 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini, variabel – variabel yang dipilih antara lain :

- Variabel tetap
 - Komposisi biogas yang terdiri dari campuran gas – gas CH₄, CO₂, H₂S, H₂O dan lain - lain
 - Temperatur operasi (T_{op}) : Pada suhu kamar (30 °C)
- Variabel Berubah
 - Tekanan umpan (P_F) : 0,5, 1,0 dan 1,5 atm
 - Heat treatment : 100, 150, 180 dan 200 °C masing – masing selama 1 menit, 2 menit dan 3 menit
 - Jenis Membran : asimetris *polyimide membranes*, asimetris *polyethersulfone – polyimide composite membranes*, asimetris *polyethersulfone – zeolite mixed matrix membranes*.

3.2 Metode Penelitian

3.2.1 Tahap I, Analisa Komposisi Biogas Sebelum Dimurnikan

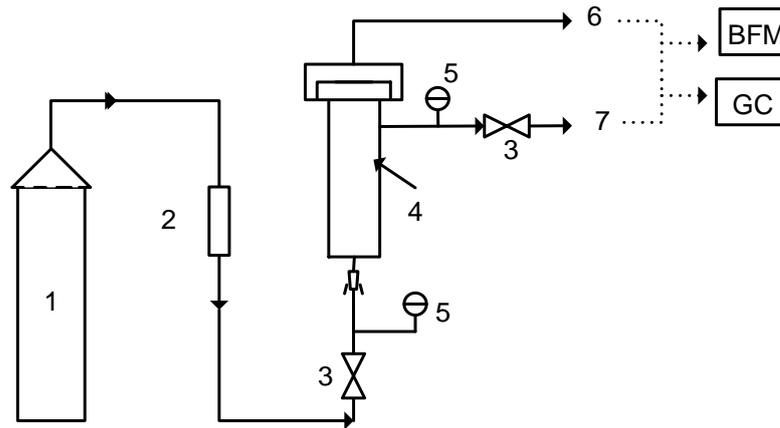
- Peralatan yang digunakan yaitu :
GC (*Gas Chromatography*) untuk menganalisa komposisi biogas
- Bahan – bahan yang digunakan yaitu :
Biogas yang akan dimurnikan adalah biogas yang diproduksi dari bahan baku kotoran sapi.
- Prinsip kerja:
Analisa pada tahap pertama yaitu dengan menggunakan alat *Gas Chromatography* (GC) sehingga dapat diketahui komposisi biogas terutama konsentrasi gas CO₂ dan konsentrasi gas CH₄. *Gas Chromatography* (GC) adalah metode pemisahan fisikokimia berdasarkan perbedaan afinitas zat yang dianalisa terhadap zat lain (fase diam dan fase gerak).
Analisa komposisi biogas akan dilakukan di Laboratorium Analisa Kimia menggunakan alat GC (*Gas Chromatography*) sehingga diketahui komposisi biogas terutama komposisi gas CH₄ dan gas CO₂.

3.2.2 Tahap II, Uji Alat Permeasi Biogas

- Peralatan yang digunakan yaitu :
 1. Pressure Regulator untuk mengatur / mengontrol tekanan biogas (umpan) yang mengalir ke dalam modul membran
 2. Tabung umpan biogas sebagai tempat penyimpanan biogas sebagai umpan
 3. Tabung biogas hasil pemurnian sebagai tempat penyimpanan biogas sebagai produk
 4. Pressure Gauge sebagai alat penunjuk (meteran) untuk mengetahui angka nominal tekanan umpan yang mengalir ke dalam modul membran
 5. Modul membran untuk tempat membran yang akan digunakan
 6. Bubble Flowmeter sebagai alat untuk mengukur laju alir gas

Gambar Rangkaian Alat Pemurnian Biogas :

Penelitian ini akan dilakukan menggunakan proses kontinu sehingga alat yang digunakan berupa rangkaian alat. Rangkaian alat yang akan digunakan, secara skematik dapat dilihat pada Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 Instrumentasi alat permeasi biogas

Keterangan :

1. Tabung biogas umpan
 2. *Single Stage Regulator* (alat ukur tekanan gas)
 3. *Valve* (bukaan kran)
 4. *Membrane Module* (Modul membrane)
 5. *Pressure Gauge* (meter / penunjuk tekanan)
 6. *Permeate* (gas CH₄)
 7. *Retentate* (gas CO₂)
- BFM = *Bubble Flow Meter* (alat ukur laju alir gas)
GC = *Gas Chromatography* (alat penentu komposisi gas)

Hasil dari penelitian akan diperoleh data permeabilitas dan selektifitas dari gas CO₂/CH₄ terhadap membran yang digunakan, dimana data – data yang diperoleh dapat menunjukkan kinerja atau *performance* suatu membran. Dua kriteria suatu teknologi pemisahan akan dipilih jika pertimbangan secara teknis dan ekonomis mudah dilakukan (Mulder, 1996).

BAB IV

JADWAL PELAKSANAAN

Penelitian ini dilaksanakan selama empat bulan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Limbah Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro dengan rincian kegiatan seperti disajikan pada Tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

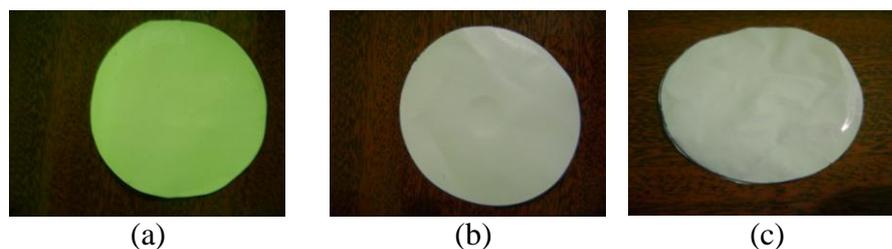
Kegiatan	Bulan Ke-															
	1				2				3				4			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur	■	■	■	■	■	■	■	■								
Penyiapan Bahan dan alat	■	■	■													
Penelitian				■	■	■	■	■	■	■						
Analisa Hasil												■				
Pembuatan Laporan Akhir													■	■		
Seminar															■	■

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini digunakan tiga jenis membran yaitu Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*. Masing – masing ketiga membran tersebut mempunyai sifat dan karakteristik yang berbeda – beda sehingga perlu dilakukan uji permeasi untuk mengetahui permeabilitas dan selektifitas membran. Permeabilitas dan selektifitas suatu membran menentukan kinerja (*performance*) baik atau tidaknya membran tersebut melakukan proses pemisahan. Di dalam penelitian ini akan dapat diketahui pengaruh *neat* polimer (*polyimide membranes*), campuran polimer (*PES – PI membranes*) dan *mixed matrix membranes* yang terdiri dari polimerik dan inorganik (*PES – zeolite membranes*), disamping itu pengaruh pelapisan (*coating*) terhadap kinerja membran juga akan dapat diketahui. Selain itu dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efek pemanasan (*heat treatment*) terhadap proses plastisasi pada *polimeric membranes* yang terjadi selama proses pemisahan CO_2/CH_4 pada biogas.

Pada Gambar 5.1 dibawah ini dapat dilihat *flat sheet membrane* berbentuk lingkaran dengan diameter 5 cm.



Gambar 5.1 *Flat Sheet Membranes* Berbentuk Lingkaran

(a) Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*

(b) Asimetris *PES – PI Composite Membranes*

(c) Asimetris *PES – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

Untuk melakukan uji permeasi maka diperlukan suatu modul (tempat) membran. Bentuk modul (tempat) membran menyesuaikan dengan bentuk membran, pada Gambar 5.2 dibawah ini dapat dilihat modul membran untuk *flat sheet membrane* berbentuk lingkaran.



Gambar 5.2 Modul Untuk *Flat Sheet Membrane* Berbentuk Lingkaran

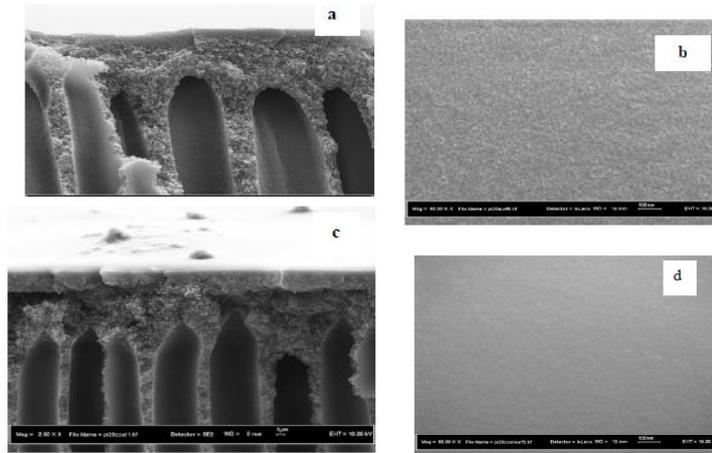
(a) Penampakan 3 Dimensi

(b) Penampakan Irisan Melintang (2 Dimensi)

5.1 Struktur Morfologi Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

5.1.1 Struktur Morfologi Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*

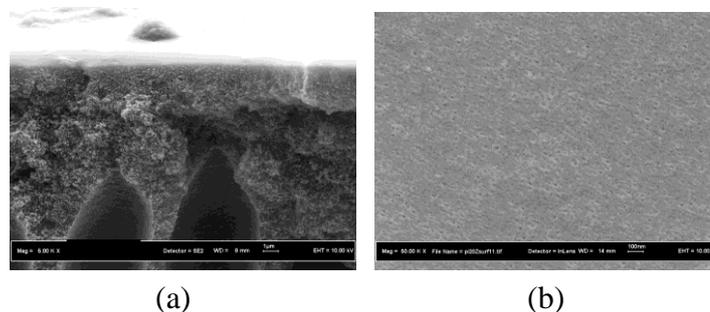
Pada Gambar 5.3 dibawah ini dapat dilihat hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)* struktur morfologi *asimetris polyimide membranes*. Pada Gambar 5.3 (a) dan (c) ditunjukkan bahwa membran *PI* yang digunakan merupakan asimetris membran, hal ini dapat dilihat adanya dua lapisan yaitu lapisan *dense* (*aktif layer*) dan lapisan *porous substructure*. Pada Gambar 5.3 (a) dapat dilihat membran *PI uncoated* memiliki struktur pori yang kurang rapat dan lapisan *dense* (*aktif layer*) lebih tipis, jika dibandingkan membran *PI coated* pada Gambar 5.3 (c) dapat dilihat membran *PI coated* memiliki struktur pori yang lebih rapat dan lapisan *dense* (*aktif layer*) lebih tebal. Sedangkan pada Gambar 5.3 (b) dapat lihat permukaan membran *PI uncoated* lebih kasar, jika dibandingkan dengan membran *PI coated* pada Gambar 5.3 (d) permukaan membran *PI coated* lebih halus.



Gambar 5.3 Hasil SEM Membran *Polyimide Uncoated* dan *Coated*
 (a) Penampang melintang *PI uncoated* (c) Penampang melintang *PI coated*
 (b) Permukaan *PI uncoated* (d) Permukaan *PI coated*

5.1.2 Struktur Morfologi Asimetris *PES – PI Composite Membranes*

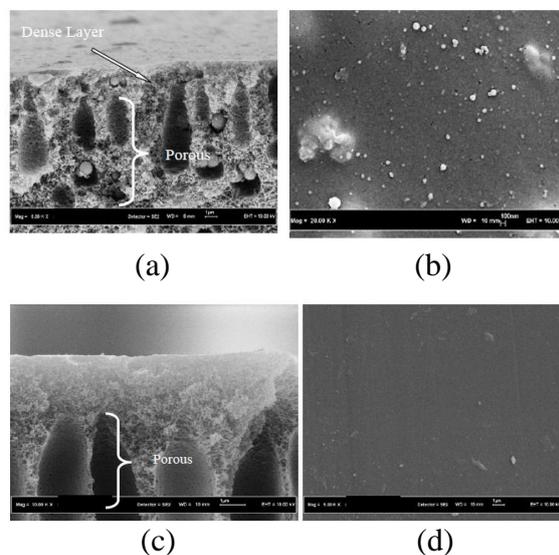
Pada Gambar 5.4 dibawah ini dapat dilihat hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) struktur morfologi asimetris *PES – PI composite membranes*. Pada Gambar 5.4 (a) ditunjukkan bahwa membran *PES – PI* yang digunakan adalah asimetris membran, hal ini dapat dilihat adanya dua lapisan yaitu lapisan *dense* (*aktif layer*) dan lapisan *porous substructure*, sedangkan pada Gambar 5.4 (b) permukaan membran *PES – PI* mempunyai ketebalan permukaan yang rata (*uniform*).



Gambar 5.4 Hasil SEM Struktur Morfologi Membran *PES – PI*
 (a) Penampang melintang
 (b) Permukaan membran

5.1.3 Struktur Morfologi Asimetris PES – Zeolite Mixed Matrix Membranes

Pada Gambar 5.5 dibawah ini dapat dilihat hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) struktur morfologi *asimetris PES – zeolite mixed matrix membranes*. Pada Gambar 5.5 ditunjukkan bahwa membran *PES – zeolite* yang digunakan merupakan asimetris membran, hal ini dapat dilihat adanya dua lapisan yaitu lapisan *dense* (*aktif layer*) dan lapisan *porous substructure*. Pada Gambar 5.5 (a) dan (b) dapat lihat membran *PES – zeolite* tanpa pemanasan, pada penampang melintang membran mempunyai struktur pori yang kurang rapat dan pada permukaan membran ketebalan (*thickness*) tidak seragam. Sedangkan pada Gambar 5.5 (c) dan (d) membran *PES – zeolite* dilakukan pemanasan (*heat treatment*) pada suhu 200 °C, pada penampang melintang membran mempunyai struktur pori yang lebih rapat (*dense*) dan pada permukaan membran mempunyai ketebalan yang seragam (*uniform*)



Gambar 5.5 Hasil SEM Struktur Morfologi Membran *PES – Zeolite*

- (a) Penampang melintang tanpa pemanasan
- (b) Permukaan membran tanpa pemanasan
- (c) Penampang melintang dengan pemanasan 200 °C
- (d) Permukaan membran dengan pemanasan 200 °C

5.2 Suhu Transisi Glass (Tg) Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

Suhu transisi glass (Tg) yaitu suatu keadaan transisi dimana terjadi perubahan dari kondisi *glassy* ke kondisi *rubbery*, sehingga pada kondisi *rubbery* maka polimer akan lebih mudah mengembang dan berikatan dengan material inorganik (*zeolite*) sehingga dapat menutup celah (*interface*) yang ada, akibatnya nilai permeability menjadi turun dan selektifitas menjadi naik (Mulder,1999). Untuk menentukan suhu transisi glass sampel film digunakan alat DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) (Vu, 2001). Suhu transisi glass menunjukkan pengukuran kualitatif dari fleksibilitas atau rigiditas rantai polimer (Simha dan Bayer,1962). Pada penelitian ini penentuan *heat treatment* pada membran dilakukan berdasarkan suhu transisi glass (Tg) masing – masing membran.

5.2.1 Suhu Transisi Glass Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*

Pada Tabel 5.1 dibawah ini dapat dilihat hasil pengukuran suhu transisi glass dengan *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* pada asimetris *polyimide membranes*. Dari Tabel 5.1 dibawah ini dapat dilihat bahwa membran *neat PI* mempunyai suhu transisi glass 319,5 °C, untuk *uncoated PI* mempunyai suhu transisi glass 320 °C dan *coated PI* mempunyai suhu transisi glass 321,7 °C. Sehingga dari data suhu transisi glass dapat disimpulkan bahwa Tg dari *PI* akan meningkat jika dilakukan pelapisan (*coating*), pelapisan akan membuat struktur *PI* semakin rapat (*dense*) karena dapat memecah ikatan molekul antar *PI*, sehingga struktur yang lebih rapat dapat meningkatkan temperatur glass *PI*.

Tabel 5.1 Suhu transisi glass asimetris *polyimide membranes*

Membran	Tg (°C)
<i>Neat PI</i>	319.5
<i>Uncoated PI</i>	320
<i>Coated PI</i>	321.7

5.2.2 Suhu Transisi Glass Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*

Dari membran *PES – PI* dengan komposisi perbandingan 1 : 1 pengukuran DSC diperoleh suhu transisi glass Tg = 223,59 °C

5.2.3 Suhu Transisi Glass Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

Pada Tabel 5.2 dibawah ini dapat dilihat hasil pengukuran suhu transisi glass dengan *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* pada asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes*. Dari Tabel 5.2 dibawah ini dapat dilihat bahwa membran *neat PES* mempunyai suhu transisi glass 216.8 °C, untuk *PES – zeolite 180 °C* mempunyai suhu transisi glass 219.3 °C dan *PES – zeolite 200 °C* mempunyai suhu transisi glass 220.6 °C. Sehingga dari data suhu transisi glass dapat disimpulkan bahwa Tg dari *PES* akan semakin meningkat jika dilakukan pemanasan, hal ini disebabkan semakin tinggi suhu pemanasan maka ikatan antar *zeolite* dengan polimer *host* akan semakin kuat / struktur semakin *dense* sehingga temperatur glass semakin tinggi (Li dkk.,1996)

Tabel 5.2 Suhu transisi glass pada asimetris *PES – zeolite*

Membran	Tg (°C)
<i>Neat PES</i>	216.8
<i>PES – zeolite 180 °C</i>	219.3
<i>PES – zeolite 200 °C</i>	220.6

5.3 Nilai Permeability CO₂ Pada Uji Permeasi CO₂/CH₄ Melalui Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*, Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*, dan Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

5.3.1 Permeability CO₂ Pada Uji Permeasi CO₂/CH₄ Melalui Asimetris *Polyimide (PI) Membranes*

Permasalahan yang sering terjadi pada glassy polimer (*polyimide*) yaitu fenomena plastisisasi / *swelling*, terutama untuk pemisahan CO₂/CH₄. Fenomena plastisisasi ini ditandai dengan meningkatnya permeability CO₂ jika tekanan umpan dinaikkan. Plastisisasi pada *polymeric* membran dapat dikurangi dengan pemanasan (*heat treatment*) pada membran.

Pada uji permeasi CO₂/CH₄ dengan menggunakan asimetris *polyimide (PI) membranes* dilakukan dengan dua perlakuan yaitu tanpa pemanasan dan dengan pemanasan. asimetris *polyimide (PI) membranes* dilakukan pemanasan pada suhu 150 °C selama 2 menit dan pada suhu 200 °C selama 2 menit. Pemilihan *heat treatment* pada asimetris *polyimide (PI) membranes* ini tidak banyak variasi karena asimetris *polyimide (PI) membranes* sudah menunjukkan nilai permeability yang baik pada kondisi tanpa *heat treatment*.

Data Hasil Permeasi CO₂/CH₄ pada Biogas :

Diketahui :

- Nilai Permeability dinyatakan dalam satuan GPU (Gas Permeation Unit)
- 1 GPU = 10⁻⁶ cm³/(cm².s.cmHg)
- A = 19,625 cm²
- 1 atm = 76 cmHg

Permeability membran $\left(\frac{P}{l} \right)$:

$$\left(\frac{P}{l} \right) = \frac{Q}{A \times \Delta P}$$

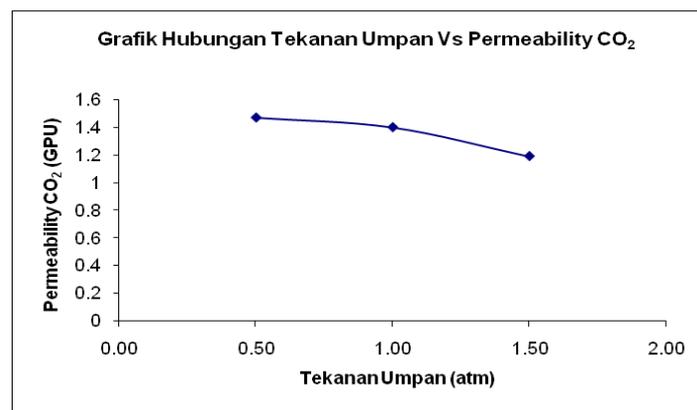
Pada Tabel 5.3 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui membran asimetris *polyimide (PI) membranes* tanpa *heat treatment*. Nilai permeability CO₂ pada tekanan 0,5 atm diperoleh sebesar 1,47 GPU, kemudian pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 1,40 GPU, dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability diperoleh sebesar 1,19 GPU. Nilai permeability CO₂ pada asimetris *polyimide (PI) membranes* tanpa *heat treatment* ini cenderung tidak stabil, pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ mengalami penurunan. Sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ juga mengalami penurunan. Pada uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* tanpa *heat treatment* menunjukkan bahwa permeability CO₂ mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tekanan.

Tabel 5.3 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* (tanpa *heat treatment*)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	0.1	80	0.0013	1.68	1.47
	0.1	93	0.0011	1.44	
	0.1	95	0.0011	1.41	
	0.1	93	0.0011	1.44	
	0.1	85	0.0012	1.58	
	0.1	93	0.0011	1.44	
	0.1	95	0.0011	1.41	
	0.1	95	0.0011	1.41	
	0.1	95	0.0011	1.41	
	0.1	93	0.0011	1.44	
1	0.1	53	0.0019	1.27	1.40
	0.1	70	0.0014	0.96	
	0.1	44	0.0023	1.52	
	0.1	46	0.0022	1.46	
	0.1	29	0.0034	2.31	
	0.1	36	0.0028	1.86	
	0.1	58	0.0017	1.16	
	0.1	56	0.0018	1.20	

	0.1	59	0.0017	1.14	
	0.1	57	0.0018	1.18	
1.5	0.1	33	0.0030	1.35	1.19
	0.1	35	0.0029	1.28	
	0.1	52	0.0019	0.86	
	0.1	48	0.0021	0.93	
	0.1	29	0.0034	1.54	
	0.1	33	0.0030	1.35	
	0.1	48	0.0021	0.93	
	0.1	45	0.0022	0.99	
	0.1	33	0.0030	1.35	
	0.1	35	0.0029	1.28	

Pada Gambar 5.8 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* tanpa *heat treatment*. Nilai permeability CO₂ cenderung tidak stabil, pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ mengalami penurunan. Sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm nilai permeability CO₂ juga mengalami penurunan. Pada uji permeasi ini tidak terjadi plastisisasi, karena semakin tinggi tekanan umpan menyebabkan permeability CO₂ semakin menurun.



Gambar 5.8 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* tanpa *heat treatment*

Pada Tabel 5.4 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 150 °C selama 2 menit. Nilai permeability CO₂ pada tekanan 0,5 atm diperoleh sebesar 2,14 GPU, kemudian pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 1,37 GPU, dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability diperoleh sebesar 1,03 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil, pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ mengalami penurunan. Sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ juga menurun. Pada uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 150 °C selama 2 menit menunjukkan bahwa permeability CO₂ mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tekanan.

Tabel 5.4 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* (*heat treatment* 150 °C, 2 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	0.1	55	0.0018	2.44	2.14
	0.1	53	0.0019	2.53	
	0.1	53	0.0019	2.53	
	0.1	70	0.0014	1.92	
	0.1	60	0.0017	2.23	
	0.1	63	0.0016	2.13	
	0.1	70	0.0014	1.92	
	0.1	70	0.0014	1.92	
	0.1	70	0.0014	1.92	
	0.1	70	0.0014	1.92	
1	0.1	80	0.0013	0.84	1.37
	0.1	32	0.0031	2.10	
	0.1	29	0.0034	2.31	
	0.1	36	0.0028	1.86	
	0.1	64	0.0016	1.05	
	0.1	62	0.0016	1.08	
	0.1	62	0.0016	1.08	
	0.1	60	0.0017	1.12	

	0.1	60	0.0017	1.12	
	0.1	60	0.0017	1.12	
1.5	0.1	43	0.0023	1.04	1.03
	0.1	46	0.0022	0.97	
	0.1	45	0.0022	0.99	
	0.1	46	0.0022	0.97	
	0.1	45	0.0022	0.99	
	0.1	40	0.0025	1.12	
	0.1	42	0.0024	1.06	
	0.1	42	0.0024	1.06	
	0.1	42	0.0024	1.06	
	0.1	42	0.0024	1.06	

Pada Tabel 5.5 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 2 menit. Nilai permeability CO₂ pada tekanan 0,5 atm diperoleh sebesar 1,22 GPU, kemudian pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 0,93 GPU, dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability diperoleh sebesar 0,70 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil, pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ mengalami penurunan. Sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ juga mengalami penurunan. Pada uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 2 menit menunjukkan bahwa permeability CO₂ mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tekanan.

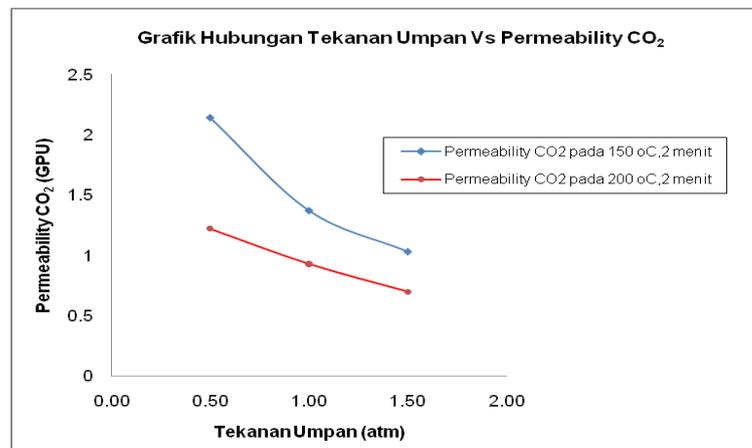
Tabel 5.5 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* (*heat treatment* 200 °C, 2 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	0.1	105	0.0010	1.28	1.22
	0.1	113	0.0009	1.19	
	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	

	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	
	0.1	110	0.0009	1.22	
1	0.1	33	0.0030	2.03	0.93
	0.1	44	0.0023	1.52	
	0.1	48	0.0021	1.40	
	0.1	61	0.0016	1.10	
	0.1	85	0.0012	0.79	
	0.1	138	0.0007	0.49	
	0.1	139	0.0007	0.48	
	0.1	139	0.0007	0.48	
	0.1	139	0.0007	0.48	
	0.1	139	0.0007	0.48	
1.5	0.1	64	0.0016	0.70	0.70
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	
	0.1	64	0.0016	0.70	

Pada Gambar 5.9 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 150 °C selama 2 menit dan 200 °C selama 2 menit. Pada *heat treatment* 150 °C selama 2 menit nilai permeability CO₂ cenderung tidak stabil, hal ini dapat dilihat pada grafik bahwa nilai permeability CO₂ cenderung mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tekanan. Hal ini juga terjadi pada *heat treatment* 200 °C selama 2 menit, nilai permeability CO₂ juga tidak stabil, karena cenderung mengalami penurunan seiring dengan kenaikan tekanan. Meskipun *heat treatment* pada suhu 150 °C dan 200 °C selama 2 menit mempunyai trend grafik yang sama, akan tetapi nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* 200 °C selama 2 menit lebih kecil dibanding *heat treatment* 150 °C selama 2 menit, hal ini disebabkan karena

pada *heat treatment* 200 °C selama 2 menit lebih mendekati suhu transisi glass polimer *PI* ($T_g = 320$ °C), sehingga pemanasan asimetris *polyimide (PI) membranes* pada suhu mendekati transisi glassnya akan menyebabkan polimer *PI* mudah mengembang / memecah ikatan molekul antar polimer menjadi *rubbery* sehingga membran mempunyai struktur *dense skin layer* lebih tebal dan porous substrukturnya semakin *dense* yang mengakibatkan nilai permeability CO_2 menurun dan diharapkan selektifitas CO_2/CH_4 akan meningkat.



Gambar 5.9 Grafik uji permeabilitas CO_2 melalui asimetris *polyimide (PI) membranes* dengan *heat treatment*

5.3.2 Permeability CO_2 Pada Uji Permeasi CO_2/CH_4 Melalui Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Polyimide (PI) Composite Membranes*

Pada uji permeasi CO_2/CH_4 dengan menggunakan asimetris *PES – PI composite membranes* dilakukan dengan dua perlakuan yaitu tanpa pemanasan dan dengan pemanasan. Asimetris *PES – PI composite membranes* dilakukan pemanasan pada suhu 180 °C selama 1 menit, 2 menit, dan 3 menit dan pada suhu 200 °C selama 1 menit, 2 menit, dan 3 menit.

Data Hasil Permeasi CO₂/CH₄ pada Biogas :

Diketahui :

- Nilai Permeability dinyatakan dalam satuan GPU (Gas Permeation Unit)
- 1 GPU = 10⁻⁶ cm³/(cm².s.cmHg)
- A = 19,625 cm²
- 1 atm = 76 cmHg

Permeability membran $\left(\frac{P}{l} \right)$:

$$\left(\frac{P}{l} \right) = \frac{Q}{A \times \Delta P}$$

Pada Tabel 5.8 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* tanpa *heat treatment*. Nilai permeability CO₂ pada tekanan 0,5 atm diperoleh sebesar 335,23 GPU, kemudian pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 335,23 GPU, dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability diperoleh sebesar 446,98 GPU. Nilai permeability CO₂ pada asimetris *PES – PI composite membranes* tanpa *heat treatment* ini cenderung stabil pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm, karena nilai permeability CO₂ tidak mengalami perubahan. Sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ meningkat yaitu dari 335,23 GPU menjadi 446,98 GPU.

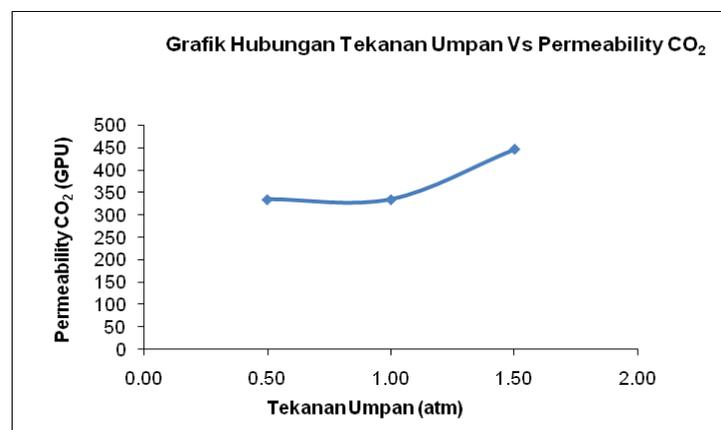
Tabel 5.8 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (tanpa *heat treatment*)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	4	0.25	335.23	335.23
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	

	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
1	1	2	0.50	335.23	335.23
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
1.5	1	1	1	446.98	446.98
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	

Pada Gambar 5.10 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* tanpa *heat treatment*. Pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm nilai permeability CO₂ cenderung stabil. Sedangkan pada kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm nilai permeability CO₂ mengalami kenaikan. Hal ini dikarenakan asimetris *PES – PI composite membranes* mengalami plastisisasi / *swelling*. Campuran polimer *glassy* yaitu polimer *PES* dengan *PI* merupakan campuran polimer yang tidak setimbang (*non equilibrium material*), hal ini disebabkan karena polimer *glassy* mengandung kelebihan volume bebas yang tidak stabil (*excess unrelaxed free volume*). Interaksi antara polimer dengan gas penetran dapat diabaikan jika gas penetran bersifat *non swelling* seperti gas O₂, N₂ dan He. Sedangkan

gas CO₂ merupakan molekul agresif yang dapat berinteraksi dengan polimer untuk meningkatkan pergerakan beberapa bagian rantai polimer yang menyebabkan perubahan dalam volume bebas (*free volume*) dan distribusi gas, sehingga terjadi fenomena plastisisasi/*swelling*, terjadinya plastisisasi/*swelling* ini dapat meningkatkan permeabilitas CO₂ akan tetapi menurunkan selektifitas CO₂/CH₄, plastisisasi/*swelling* dapat dikurangi dengan cara pemanasan pada suhu transisi glassnya (T_g) (Zhou, 2005).



Gambar 5.10 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* tanpa *heat treatment*

Pada Tabel 5.9 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 180 °C selama 1 menit. Nilai permeability CO₂ pada tekanan 0,5 atm diperoleh sebesar 1340,93 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 2234,89 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 4469,77 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil, karena nilai permeability CO₂ mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya tekanan. Hal ini disebabkan karena asimetris *PES – PI composite membranes* mengalami plastisisasi / *swelling*.

Tabel 5.9 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 180 °C,1 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	1	1.00	1340.93	1340.93
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
	1	1	1.00	1340.93	
1	10	3	3.33	2234.89	2234.89
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
	10	3	3.33	2234.89	
1.5	10	1	10	4469.77	4469.77
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	
	10	1	10	4469.77	

Pada Tabel 5.10 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 180 °C selama 2 menit. Pada tekanan 0,5 atm diperoleh nilai permeability CO₂ sebesar 83,01 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar

83,81 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 111,74 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung stabil pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ meningkat.

Tabel 5.10 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 180 °C,2 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	0.5	7	0.07	95.78	83.01
	0.5	7	0.07	95.78	
	0.5	7	0.07	95.78	
	0.5	7	0.07	95.78	
	0.5	9	0.06	74.50	
	0.5	9	0.06	74.50	
	0.5	9	0.06	74.50	
	0.5	9	0.06	74.50	
	0.5	9	0.06	74.50	
	0.5	9	0.06	74.50	
1	0.5	4	0.13	83.81	83.81
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
	0.5	4	0.13	83.81	
1.5	0.5	2	0.25	111.74	111.74
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	
	0.5	2	0.25	111.74	

Pada Tabel 5.11 dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 180 °C selama 3 menit. Pada tekanan 0,5 atm diperoleh nilai permeability CO₂ sebesar 446,98 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 335,23 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 446,98 GPU. Nilai permeability pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Dari ketiga variasi *heat treatment* yaitu pada suhu 180 °C selama 1 menit, 180 °C selama 2 menit, dan 180 °C selama 3 menit maka nilai permeability CO₂ paling rendah diperoleh pada *heat treatment* 180 °C selama 2 menit pada uji tekanan 0,5 atm yaitu sebesar 83,01 GPU, sedangkan nilai permeability CO₂ paling tinggi diperoleh pada *heat treatment* 180 °C selama 1 menit pada uji tekanan 1,5 atm yaitu sebesar 4469,77 GPU.

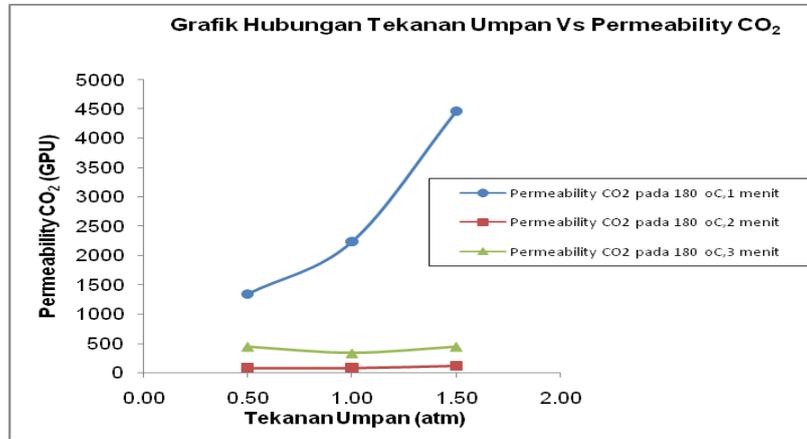
Tabel 5.11 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 180 °C,3 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	3	0.33	446.98	446.98
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
	1	3	0.33	446.98	
1	1	2	0.50	335.23	335.23
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	

	1	2	0.50	335.23	
1.5	1	1	1	446.98	446.98
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	

Pada Gambar 5.11 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 180 °C masing – masing selama 1 menit, 2 menit, dan 3 menit. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* 180 °C selama 1 menit cenderung tidak stabil, hal ini dapat dilihat pada gambar bahwa nilai permeability CO₂ mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya tekanan, sehingga selektifitas CO₂/CH₄ akan semakin menurun. Hal ini disebabkan karena asimetris *PES – PI composite membranes* mengalami plastisisasi/*swelling*, fenomena plastisisasi ini dapat menaikkan nilai permeability CO₂, akan tetapi menurunkan selektifitas CO₂/CH₄, terjadinya plastisisasi ini disebabkan karena gas CO₂ berinteraksi dengan polimer *PES – PI*, sehingga mengakibatkan perubahan struktur volume bebas (*free volume*) dari rantai polimer *PES – PI* (Zhou, 2005). Terjadinya plastisisasi pada membran campuran *PES – PI* ini sangat tidak diinginkan karena dapat menurunkan selektifitas CO₂/CH₄ sehingga akan menghasilkan produk CH₄ dengan kemurnian rendah. Sedangkan nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* 180 °C selama 2 menit dan 3 menit cenderung lebih stabil dan lebih rendah bila dibandingkan *heat treatment* 180 °C selama 1 menit, hal ini dikarenakan waktu *heat treatment* yang lebih lama akan menyebabkan asimetris *PES – PI composite membranes* mempunyai struktur *dense skin layer* lebih tebal dan porous substrukturnya semakin *dense* sehingga akan

menurunkan permeabilitas CO₂ dan diharapkan selektifitas CO₂/CH₄ akan meningkat.



Gambar 5.11 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment*

Pada Tabel 5.12 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 1 menit. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 670,47 GPU, pada tekanan 1 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 446,98 GPU dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 446,98 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung stabil pada kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1.5 atm, sedangkan kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ mengalami penurunan dari 670,47 GPU menjadi 446,98 GPU.

Tabel 5.12 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 200 °C,1 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	2	0.50	670.47	670.47
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
	1	2	0.50	670.47	
1	2	3	0.67	446.98	446.98
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
	2	3	0.67	446.98	
1.5	1	1	1	446.98	446.98
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	

Pada Tabel 5.13 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 2 menit. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 357,58 GPU, pada tekanan 1 atm nilai permeability

CO₂ diperoleh sebesar 335,23 GPU dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 446,98 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ menurun dari 357,58 GPU menjadi 335,23 GPU, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan permeability CO₂ meningkat dari 335,23 GPU menjadi 446,98 GPU.

Tabel 5.13 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 200 °C,2 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	3	0.33	446.98	357.58
	1	3	0.33	446.98	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
	1	4	0.25	335.23	
1	1	2	0.50	335.23	335.23
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
	1	2	0.50	335.23	
1.5	1	1	1	446.98	446.98
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	
	1	1	1	446.98	

	1	1	1	446.98
	1	1	1	446.98
	1	1	1	446.98
	1	1	1	446.98

Pada Tabel 5.14 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 3 menit. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 172,41 GPU, pada tekanan 1 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 191,56 GPU dan pada tekanan 1,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 223,49 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ meningkat dari 172,41 GPU menjadi 191,56 GPU, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ meningkat dari 191,56 GPU menjadi 223,49 GPU.

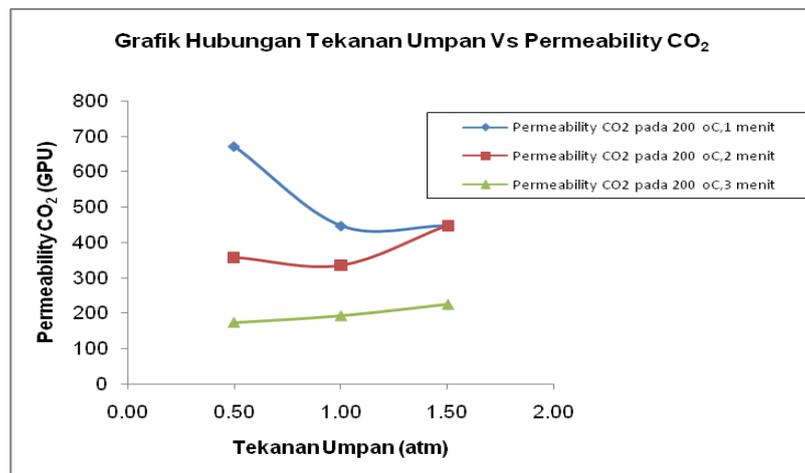
Tabel 5.14 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* (*heat treatment* 200 °C,3 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	1	7	0.14	191.56	172.41
	1	7	0.14	191.56	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
	1	8	0.13	167.62	
1	2	7	0.29	191.56	191.56
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	

	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
	2	7	0.29	191.56	
1.5	1	2	0.5	223.49	223.49
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	
	1	2	0.5	223.49	

Pada Gambar 5.12 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C masing – masing selama 1 menit, 2 menit, dan 3 menit. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* 200 °C selama 1 menit cenderung tidak stabil, kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ mengalami penurunan dari 670,47 GPU menjadi 446,98 GPU, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm nilai permeability CO₂ cenderung stabil / tidak mengalami perubahan. Pada *heat treatment* 200 °C selama 2 menit nilai permeability CO₂ juga tidak stabil, kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ mengalami penurunan dari 357,58 GPU menjadi 335,23 GPU, dan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan nilai permeability CO₂ meningkat dari 335,23 GPU menjadi 446,98 GPU. Sedangkan pada *heat treatment* 200 °C selama 3 menit nilai permeability CO₂ cenderung mengalami peningkatan, nilai permeability meningkat seiring dengan kenaikan tekanan, hal ini disebabkan karena membran *PES – PI* mengalami plastisisasi / *swelling*, dimana gas penetran / gas CO₂ berinteraksi dengan polimer *PES – PI*, sehingga mengakibatkan perubahan struktur volume bebas (*free volume*) dari rantai polimer *PES – PI* (Zhou,

2005). Terjadinya plastisasi pada asimetris *PES – PI composite membranes* ini sangat tidak diinginkan karena dapat meningkatkan permeability CO₂ akan tetapi menurunkan selektifitas CO₂/CH₄ sehingga akan menghasilkan produk CH₄ dengan kemurnian rendah. Dari ketiga variasi *heat treatment* yaitu 200 °C selama 1 menit, 200 °C selama 2 menit, dan 200 °C selama 3 menit, nilai permeability CO₂ paling rendah diperoleh pada *heat treatment* 200 °C selama 3 menit pada uji tekanan 0,5 atm, hal ini dikarenakan waktu *heat treatment* yang semakin lama akan menyebabkan membran mempunyai struktur *dense skin layer* lebih tebal dan porous substrukturnya semakin *dense* sehingga permeability CO₂ akan semakin menurun, sedangkan nilai permeability CO₂ paling tinggi diperoleh pada *heat treatment* 200 °C selama 1 menit pada uji tekanan 0,5 atm, hal ini dikarenakan waktu pemanasan yang belum cukup lama, sehingga tidak berpengaruh terhadap *dense skin layer* dan porous substrukturnya.



Gambar 5.12 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – PI composite membranes* dengan *heat treatment*

5.3.3 Permeability CO₂ Pada Uji Permeasi CO₂/CH₄ Melalui Asimetris *Polyethersulfone (PES) – Zeolite Mixed Matrix Membranes*

Pada uji permeasi CO₂/CH₄ dengan menggunakan asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dilakukan dengan dua perlakuan yaitu tanpa pemanasan dan dengan pemanasan. Dalam *Mixed Matrix Membranes*

masalah yang sering dijumpai yaitu terbentuknya celah (*interface*) antara polimer (*polyethersulfone*) dengan material inorganik (*zeolite*). Pembentukan celah ini dapat menyebabkan selektifitas pemisahan menurun / rendah sehingga kinerja membran dalam proses pemisahan menjadi turun karena mekanisme yang dominan yaitu *knudsen diffusion*. Dalam mekanisme pemisahan *Mixed Matrix Membranes* untuk mendapatkan selektifitas yang tinggi maka mekanisme yang harus dominan yaitu *solution diffusion* dan *molecular sieve*, karena jika yang dominan *knudsen diffusion* maka dapat dikatakan bahwa membran tersebut mempunyai celah / lubang, hal ini dapat dilihat dari nilai permeabilitas yang tinggi akan tetapi selektifitas / kemurnian rendah.

Dengan tujuan pemanasan pada suhu transisi glass (T_g) ini diharapkan dapat menaikkan selektifitas / kemurnian pemisahan CO_2/CH_4 pada biogas, karena dengan pemanasan pada suhu transisi glass (T_g) ini dapat menyebabkan polimer mengembang dan berikatan dengan inorganiknya sehingga dapat menutup celah (*interface*) yang ada.

Data Hasil Permeasi CO_2/CH_4 pada Biogas :

Diketahui :

- Nilai Permeability dinyatakan dalam satuan GPU (Gas Permeation Unit)
- $1 \text{ GPU} = 10^{-6} \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$
- $A = 19,625 \text{ cm}^2$
- $1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg}$

Permeability membran $\left(\frac{P}{l} \right)$:

$$\left(\frac{P}{l} \right) = \frac{Q}{A \times \Delta P}$$

Pada Tabel 5.15 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO_2 melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* tanpa *heat treatment*. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO_2 diperoleh sebesar

837,82 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 838,08 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 1117,44 GPU. Dari data hasil permeability CO₂ ini dapat disimpulkan bahwa nilai permeabilitas masih terlalu tinggi / tidak terjadi permeasi CO₂/CH₄ pada asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* karena asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* yang digunakan mengalami kebocoran atau terdapat celah (*interface*) antara polimer (*PES*) dengan inorganik (*zeolite*). Hal ini dapat dilihat dari nilai permeability CO₂ yang meningkat seiring dengan kenaikan tekanan.

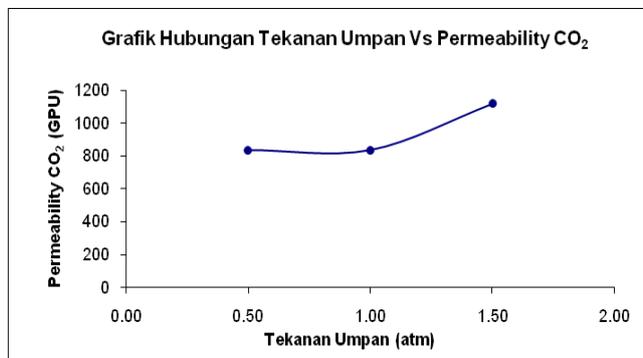
Mekanisme yang dominan terjadi pada uji permeasi ini yaitu *knudsen diffusion*, dimana pemisahan yang terjadi berdasarkan ukuran pori membran, molekul – molekul gas yang dipisahkan lebih sering bertumbukan dengan dinding pori dibanding tumbukan antar molekul gas, besarnya koefisien *knudsen diffusion* (*D_k*) tergantung dari temperatur, berat molekul gas, dan ukuran radius pori membran (Mulder,1999).

Tabel 5.15 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* (tanpa *heat treatment*)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	5	8	0.63	838.08	837.82
	3	4	0.75	1005.70	
	5	7	0.71	957.81	
	5	7	0.71	957.81	
	5	9	0.56	744.96	
	5	9	0.56	744.96	
	5	9	0.56	744.96	
	4	6	0.67	893.95	
	5	9	0.56	744.96	
	5	9	0.56	744.96	
1	5	4	1.25	838.08	838.08
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	

	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
	5	4	1.25	838.08	
1.5	5	2	2.50	1117.44	1117.44
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	

Pada Gambar 5.13 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* tanpa *heat treatment*. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ sebesar 837,82 GPU, tekanan 1 atm sebesar 838,08 GPU dan tekanan 1,5 atm sebesar 1117,44 GPU. Pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm sampai 1 atm nilai permeability CO₂ cenderung stabil, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm sampai 1,5 atm nilai permeability CO₂ cenderung melonjak / mengalami kenaikan, hal ini dikarenakan asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* mengalami kebocoran / terdapat celah (*interface*) antara polimer dengan inorganik.



Gambar 5.13 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* tanpa *heat treatment*.

Pada Tabel 5.16 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dengan *heat treatment* 100 °C selama 5 menit, pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ sebesar 12738,85 GPU, pada tekanan 1 atm sebesar 1676,16 GPU dan pada tekanan 1,5 atm sebesar 1005,70 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ menurun drastis dari 12738,85 GPU menjadi 1676,16 GPU, dan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan permeability CO₂ mengalami penurunan dari 1676,16 menjadi 1005,70 GPU.

Tabel 5.16 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* (*heat treatment* 100 °C, 5 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	10	2	5	6704.66	12738.85
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
	10	1	10	13409.32	
1	5	2	2.5	1676.16	1676.16
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
	5	2	2.5	1676.16	
1.5	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	

1.5	3	4	0.75	1005.70	1005.70
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	
	3	4	0.75	1005.70	

Pada Tabel 5.17 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 180 °C selama 5 menit. Pada tekanan 0,5 atm nilai permeability CO₂ diperoleh sebesar 817,97 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 1089,51 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 1117,44 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ meningkat dari 817,97 GPU menjadi 1089,51 GPU, dan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan permeability CO₂ juga meningkat dari 1089,51 GPU menjadi 1117,44 GPU.

Tabel 5.17 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* (*heat treatment* 180 °C, 5 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	3	5	0.6	804.56	817.97
	3	5	0.6	804.56	
	3	5	0.6	804.56	
	3	5	0.6	804.56	
	3	5	0.6	804.56	
	3	5	0.6	804.56	
	5	8	0.625	838.08	
	5	8	0.625	838.08	
	5	8	0.625	838.08	
	5	8	0.625	838.08	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	

1	5	3	1.67	1117.44	1089.51
	5	4	1.25	838.08	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	
	5	3	1.67	1117.44	
1.5	5	2	2.50	1117.44	1117.44
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	
	5	2	2.50	1117.44	

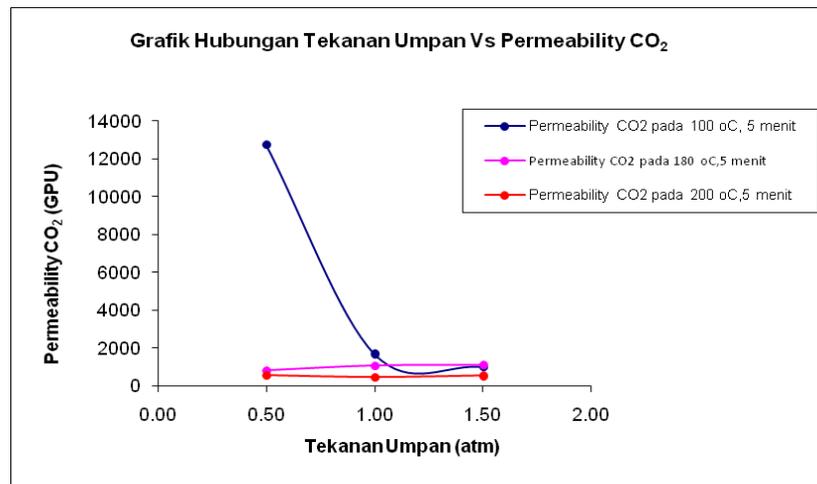
Pada Tabel 5.18 dibawah ini dapat dilihat hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dengan *heat treatment* pada suhu 200 °C selama 5 menit. Pada tekanan 0,5 atm diperoleh nilai permeability CO₂ sebesar 571,5 GPU, pada tekanan 1 atm diperoleh sebesar 486,89 GPU dan pada tekanan 1,5 atm diperoleh sebesar 558,72 GPU. Nilai permeability CO₂ pada *heat treatment* ini cenderung tidak stabil. Kenaikan tekanan dari 0,5 atm menjadi 1 atm menyebabkan permeability CO₂ mengalami penurunan dari 571,5 GPU menjadi 486,89 GPU, sedangkan kenaikan tekanan dari 1 atm menjadi 1,5 atm menyebabkan permeability CO₂ meningkat dari 486,89 GPU menjadi 558,72 GPU. Dari ketiga variasi *heat treatment* yaitu 100 °C selama 5 menit, 180 °C selama 5 menit dan 200 °C selama 5 menit, nilai permeability CO₂ paling rendah diperoleh pada *heat treatment* suhu 200 °C selama 5 menit pada tekanan 1 atm, dan nilai permeability CO₂ paling tinggi diperoleh pada *heat treatment* suhu 100 °C selama 5 menit pada tekanan 0,5 atm.

Tabel 5.18 Nilai permeability CO₂ melalui asimetris PES – zeolite mixed matrix membranes (heat treatment 200 °C,5 menit)

Tekanan (atm)	Volume CO ₂ (ml)	Waktu (s)	Laju alir (ml/s)	Permeability CO ₂ (GPU)	Permeability Rata - rata CO ₂ (GPU)
0.5	5	13	0.38	515.74	571.51
	5	12	0.42	558.72	
	5	8	0.63	838.08	
	5	9	0.56	744.96	
	5	14	0.36	478.90	
	5	13	0.38	515.74	
	5	13	0.38	515.74	
	5	13	0.38	515.74	
	5	13	0.38	515.74	
	5	13	0.38	515.74	
1	5	7	0.71	478.90	486.89
	5	7	0.71	478.90	
	5	6	0.83	558.72	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
	5	7	0.71	478.90	
1.5	5	4	1.25	558.72	558.72
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	
	5	4	1.25	558.72	

Pada Gambar 5.14 dibawah ini dapat dilihat grafik hasil uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dengan variasi *heat treatment*. Pada *heat treatment* 100 °C selama 5 menit dapat dilihat nilai permeability CO₂ cenderung tidak stabil, pada kenaikan tekanan dari 0,5 atm sampai 1 atm nilai permeability CO₂ menurun drastis, kemudian dari tekanan 1 atm sampai 1,5 atm nilai permeability CO₂ mengalami sedikit kenaikan. Pada *heat treatment* 180 °C selama 5 menit nilai permeability CO₂ cenderung tidak stabil dengan mengalami sedikit kenaikan dan penurunan, sedangkan pada *heat treatment* 200 °C selama 5 menit nilai permeability CO₂ juga cenderung tidak stabil. Dari ketiga *heat treatment* terhadap asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* yaitu 100 °C selama 5 menit, 180 °C selama 5 menit dan 200 °C selama 5 menit maka nilai permeability CO₂ dicapai paling rendah pada *heat treatment* 200 °C selama 5 menit pada uji tekanan 1 atm, hal ini dikarenakan pemanasan pada suhu 200 °C lebih mendekati ke suhu transisi glass (T_g) polimer *polyethersulfone* yaitu berkisar 220 °C (Mulder, 1999), sehingga *heat treatment* yang mendekati suhu transisi glass akan memberikan pengaruh terhadap nilai permeability CO₂ yaitu nilai permeability CO₂ akan mengalami penurunan, karena struktur *dense skin layer* membran lebih tebal dan porous substrukturnya semakin *dense*. Selain itu pengaruh *heat treatment* pada suhu transisi glassnya akan menyebabkan polimer *PES* mudah mengembang dan berikatan dengan material inorganiknya (*zeolite*) sehingga dapat menutup celah (*interface*) yang terbentuk antara polimer dengan inorganiknya, sehingga diharapkan dapat meningkatkan selektifitas CO₂/CH₄.

Meskipun nilai permeability CO₂ lebih rendah pada 200 °C selama 5 menit akan tetapi nilai selektifitasnya pada kondisi ini masih rendah, karena nilai permeability masih terlalu tinggi, sehingga dari ketiga *heat treatment* diatas masih belum memenuhi standar kinerja (*performance*) asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes*.



Gambar 5.14 Grafik uji permeabilitas CO₂ melalui asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dengan *heat treatment*

Dari ketiga jenis membran yang digunakan yaitu asimetris *polyimide (PI) membranes*, asimetris *PES – PI composite membranes* dan asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes*, maka dilihat dari nilai permeability CO₂ dapat disimpulkan bahwa membran asimetris *polyimide (PI) membranes* memiliki nilai permeability CO₂ yang bagus / lebih kecil nilainya dibanding nilai permeability CO₂ dari membran yang lain. Untuk mengetahui berhasil atau tidaknya asimetris *polyimide (PI) membranes* melakukan pemisahan CO₂/CH₄ maka perlu dilakukan analisa GC (*Gas Chromatography*) pada komposisi awal biogas / sebelum permeasi dan komposisi akhir biogas / sesudah permeasi. Dari komposisi biogas sebelum dan sesudah permeasi dapat diketahui selektifitas pemisahan CO₂/CH₄, sehingga diharapkan kemurnian / kandungan CH₄ akan meningkat setelah dilakukan permeasi.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang kami lakukan terhadap 3 jenis membran yaitu asimetris *polyimide (PI) membranes*, asimetris *PES – PI composite membranes*, dan asimetris *PES – zeolite mixed matrix membranes* dapat disimpulkan bahwa :

1. Berdasarkan nilai permeability CO₂ yang diperoleh, maka asimetris *polyimide (PI) membranes* memiliki nilai permeability yang bagus dibandingkan dengan kedua membran yang lain.
2. Pada ketiga membran tersebut nilai permeability CO₂ cenderung lebih kecil dan stabil jika dilakukan pemanasan (*heat treatment*) pada suhu yang lebih tinggi atau mendekati suhu transisi glass (T_g).
3. Dari hasil analisa GC (*Gas Chromatography*) pada permeasi dengan membran ditunjukkan bahwa komposisi CO₂ pada *permeate* biogas lebih kecil dan komposisi CO₂ pada *retentate* biogas lebih besar jika dibandingkan dengan komposisi CO₂ pada umpan biogas.

6.2 Saran

1. Selama penelitian berlangsung tidak boleh terjadi kebocoran biogas, baik terhadap sambungan selang ataupun pada modul membran.
2. Desain alat terutama pada sambungan dengan menggunakan selang plastik sebaiknya diganti dengan pipa aluminium atau sejenisnya agar proses permeasi dapat berlangsung pada tekanan yang lebih tinggi dan bervariasi, pada percobaan kami selang plastik hanya mampu bertahan pada tekanan sekitar 2 atm, jika melebihi maka selang plastik mudah pecah, hal ini disebabkan karena panas yang ditimbulkan kompresor.
3. Selama penelitian berlangsung membran tidak boleh cacat (berlubang atau terlipat).

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, Hiskia, Kimia Unsur dan Radiokimia, PT. Citra Aditya Bakti, Bandung, 2001.
- Cao, Chun, R. Wang, T. S. Chung and Y. Liu, Formation Of High-Performance 6FDA-2,6-DAT Asymmetric Composite Hollow Fiber Membranes For CO₂ / CH₄ Separation, *Journal of Membrane Science*, 2002, vol. 209, pp. 309 – 319.
- Chung, Tai-Shung, L. Y. Jiang, Y. Li and S. Kulprathipanja, Mixed Matrix Membranes (MMMS) Comprising Organic Polymers With Dispersed Inorganic Fillers for Gas Separation, 2007, pp. table 3.
- Coulson, J. M. and J. F. Richardson, *Chemical Engineering Design*, 4th Edition, vol. 6, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- Fessenden, Ralp J. and J. S. Fessenden, *Kimia Organik Jilid 1*, Edisi Ke-3, Erlangga, Jakarta, 1989, pp. 102 – 103.
- Hambali, E, S. Mujdalipah, A. H. Tambunan, A. W. Pattiwiri dan R. Hendroko, *Teknologi Bioenergi*, Agro Media Pustaka, 2007, pp. 53.
- Harasimowicz, M., P. Orluk , G. Zakrzewska-Trznadel and A.G. Chmielewski, Application of Polyimide Membranes for Biogas Purification and Enrichment, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 144, pp. 698 – 702.
- Huang, Zhen.2005. Enhanced Gas Separation Properties by Using Nanostructured PES – Zeolite 4A Mixed Matrix Membranes. Department of Packaging Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, People's Republic of China.

- Ismaila, A. F., I.R. Dunkinb, S.L. Gallivanb and S.J. Shiltonc, Production of Super Selective Polysulfone Hollow Fiber Membranes for Gas Separation, *Polymer*, 1999, vol. 40, pp. 6500.
- Kapdi, S.S, V.K. Vijay, S.K. Rajesh and R.Prasad, Biogas Scrubbing, Compression and Storage: Perspective and Prospectus in Indian Context, *Renewable Energy*, 2005, vol. 30, pp. 1196 – 1199.
- Lastella, G., C. Testa, G. Cornacchia, M. Notornicole, F. Voltasio and V. K. Sharma, Anaerobic Digestion of Semi-Solid Organic Waste : biogas production and its purification Energy Conversion ang management, Vol 43, Issue I, 2002, pp. 63 – 75.
- Lin, Wen-Hui, T. T. Chunga, Gas Permeability, Diffusivity, Solubility, and Aging Characteristics of 6FDA-Durene Polyimide Membranes, *Journal of Membrane Science*, 2001, vol. 183, pp. 183 – 193.
- Liu, Wen-Hui, T. T. Chunga, Mixed Matrix Membranes Incorporating Surface-Functionalized Molecular Sieve Nanoparticles and Methods For Making The Same, U.S., Patent No. 0039554 A1, 2008.
- L., Widarto dan Sudarto, *Membuat Biogas*, Penerbit Kanisius, 1997, pp. 10.
- Mulder, Marcel, *Basic Principles of Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers, London, 1996, pp. 51 – 59, pp. 307 – 319, pp. 465 – 479.
- Noverri, Prayudi.2007. *Aplikasi Membran Kontaktor untuk Pemisahan CO₂*
- Pabby, Anil K, S. S. H. Rizvi and A. M. Sastre, *Handbook of Membrane Separations Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological*

Applications, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2009, pp. 66 – 100.

Padmasiri, Sudini I., J. Zhang, M. Fitch, B. Norddahl, E. Morgenroth and L. Raskin, Methanogenic Population Dynamics and Performance of an Anaerobic Membrane Bioreactor (ANMBR) Treating Swine Manure Under High Shear Conditions (Journal), 2007.

Pei Shi Tin, Tai-Shung Chung, Ye Liu, Rong Wang. Chemical Cross-linking Modification on Polyimide Membrane for Gas Separation. Department of Chemical and Environmental Engineering National University of Singapore, Singapore 119260.

Perry, R. H., Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th Edition, Mc Graw Hill Companies Inc., New York, 1997, pp. table 2-1 & 2-2.

Price, E.C and Cheremisinoff, P.N. 1981. Biogas Production and Utilization. Ann Arbor Science Publishers, Inc .United States of America

Sen, D. Kalipcilar, H and Yilmaz, L. 2006. '*Development of Zeolite Filled Polycarbonate Mixed Matrix Gas Separation Membranes*'. Department of Chemical Engineering, Middle East Technical University, 06531. Ankara : Turkey.

Vogel, Arthur, Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro, Edisi Ke-5, Kalman Media Pusaka, Jakarta, 1985, pp. 110 – 118.

Wellinger, A. and A. Lindeberg, Biogas Upgrading and Utilization – IEA Bioenergy, Task 24, International Energy Association, France, 2000, pp.20.

