



**SKRIPSI – TK141581**

**PEMODELAN DAN SIMULASI PROSES  
PEMISAHAN H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> DI DALAM MEMBRAN  
PERMEASI**

**Oleh :**

**Moch Saiful Azis  
NRP. 2313 100 132**

**Arif Rochman Hartono  
NRP. 2313 100 133**

**Dosen Pembimbing 1:  
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
NIP. 19761020 200501 2 001**

**Dosen Pembimbing 2:  
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D.  
NIP. 19840508 200912 2 004**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**



**FINAL PROJECT – TK141581**

**THE MODELLING AND SIMULATION OF  
H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> SEPARATION PROCESS IN THE  
PERMEATION MEMBRANE**

**Written by :  
Moch Saiful Azis  
NRP. 2313 100 132**

**Arif Rochman Hartono  
NRP. 2313 100 133**

**Advisor 1:  
Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
NIP. 19761020 200501 2 001**

**Advisor 2:  
Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D.  
NIP. 19840508 200912 2 004**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PEMODELAN DAN SIMULASI PROSES PEMISAHAN H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> DI DALAM MEMBRAN PERMEASI

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

**Moch Saiful Azis**  
**Arif Rochman Hartono**

**NRP : 2313 100 132**  
**NRP : 2313 100 133**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. .....(Pembimbing 1)
2. Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D. .....(Pembimbing 2)
3. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S. .....( Penguji 1 )
4. Dr. Ir. Susianto, DEA .....( Penguji 2 )
5. Prof. Dr. Ir. M. Rachimoellah, Dipl. EST .....( Penguji 3 )



# PEMODELAN DAN SIMULASI PROSES PEMISAHAN H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> DI DALAM MEMBRAN PERMEASI

**Nama** : 1. Moch Saiful Azis  
2. Arif Rochman Hartono  
**NRP** : 1. 2313 100 132  
2. 2313 100 133  
**Pembimbing I** : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
**Pembimbing II** : Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D.

## ABSTRAK

Pada industri perminyakan dan gas, hidrogen digunakan dalam *hydroprocessing* untuk meningkatkan kualitas bahan bakar dan meningkatkan jumlah produksi. Konsumsi Hidrogen dalam *hydroprocessing* berdasarkan kandungan bahan baku dan proses pembuangan pengotor. Bahan baku yang mengandung hidrokarbon yang lebih berat akan menyebabkan konsumsi hidrogen yang semakin banyak untuk mencapai kuantitas dan kualitas produksi bahan bakar yang ingin dicapai. Salah satu teknologi pemisahan hidrogen dari methane yang diaplikasikan adalah membrane permease. Proses pemisahan dengan membran dapat digambarkan sebagai suatu lapisan yang terdapat di antara dua bagian fluida yaitu fasa *feed* dan fasa permeat. Penggunaan membran pada proses pemisahan tidak serta-merta menghasilkan kualitas produk yang baik dan *operational cost* yang rendah. Perlu dilakukan suatu pemodelan guna mencapai kualitas produk yang diinginkan pada kondisi operasi tertentu dengan *operational cost* seminimal mungkin. Pada penelitian ini, digunakan *solution-diffusion model*, dimana permeat terpisahkan karena perbedaan kelarutan zat pada membrane dan juga perbedaan laju difusi zat melalui membran. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model matematis pemisahan Hidrogen dari methana untuk memprediksi komposisi aliran permeat dan rafinat secara akurat, *Hidrogen*

*recovery*, dan kondisi operasi optimal untuk sistem membran permease yang dipakai. Hasil simulasi menunjukkan kenaikan temperatur feed menyebabkan kenaikan pada persen *recovery*. Hal ini dikarenakan permeabilitas gas meningkat seiring peningkatan temperature feed. Selain itu, kenaikan tekanan feed menyebabkan kenaikan persen *recovery* juga karena perbedaan tekanan yang merupakan driving force untuk perpindahan massa gas semakin besar. Model simulasi ini divalidasi dengan data eksperimen yang didapatkan dari penelitian yang telah dilakukan Fauzan Ahmad (2012) dengan persen error rata-rata yaitu 2,49 %.

Kata kunci: membran permease, *solution-diffusion model*, *Hydrogen recovery*

# THE MODELLING AND SIMULATION OF H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> SEPARATION PROCESS IN THE PERMEATION MEMBRANE

Name : 1. Moch Saiful Azis  
2. Arif Rochman Hartono  
NRP : 1. 2313 100 132  
2. 2313 100 133  
Advisor I : Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T.  
Advisor II : Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D.

## ABSTRACT

In oil and gas industry, hydrogen is used in hydroprocessing unit to increase the quality and quantity of fuel. The consumption of hydrogen in hydroprocessing unit is based on the composition of raw materials and impurities rejecting process. The raw materials which contained heavier hydrocarbon will cause more hydrogen consumed to reach the quantity and the quality of the fuel. Permeation membrane for separation process is illustrated as a solid layer separating two parts of liquid which are feed and permeate part. Unfortunately, the use of membrane for separation process does not necessarily produce good quality product and low operational cost. Therefore, a model should be created to obtain desirable product specs at certain operating condition with low operational cost. In this study, *Solution-Diffusion model*, which permeate is separated since solubility and diffusivity differences between two material through membrane, is used. The objectives of this study are to create mathematic model for hydrogen/methane separation to predict the composition of permeant and raffinate accurately, *hydrogen recovery*, and optimum operation condition for permeation membrane system used. The simulation result shows that increasing feed temperature will lead to increasing percent recovery. It is because of permeability of gas is increased as increasing feed temperature. In addition, the higher feed pressure

leads to increasing percent recovery as well because of pressure differences as driving force of mass transfer in membrane is increased. The simulation model is validated with experimental data obtained from research that has been performed by Fauzan Ahmad (2012) with average percent error is 2,49%.

Keywords: permeation membrane, *solution-diffusion model*, *Hydrogen recovery*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT karena dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan Proposal Skripsi yang berjudul:

### **“PEMODELAN DAN SIMULASI PROSES PEMISAHAN $H_2/CH_4$ DI DALAM MEMBRAN PERMEASI”**

Tugas Proposal Skripsi ini merupakan salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan kali ini, kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, MSc selaku Kepala Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa.
3. Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T. dan Siti Nurkhamidah, S.T., M.S., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan bagi kami.
4. Orangtua dan keluarga kami atas segala kasih sayang dan pengertian yang telah diberikan.
5. Bapak/Ibu dosen pengajar serta seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
6. Rekan-rekan Laboratorium Proses Perpindahan Panas dan Massa, rekan-rekan Teknik Kimia angkatan 2013 atas kebersamaannya dan semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak, sehingga kami dapat menyelesaikan tugas Proposal Skripsi ini.

Kami menyadari bahwa penyusunan Proposal Skripsi ini masih perlu penyempurnaan, oleh karena itu kami mengharap saran dan kritik yang membangun. Semoga laporan tugas akhir

ini dapat bermanfaat bagi kita semua, khususnya di bidang teknik kimia dan aplikasi industri kimia. Terima kasih.

Surabaya, 7 Juli 2017

Penyusun

# DAFTAR ISI

Abstrak .....	i
Abstract .....	iii
Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vi
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
I.1 Latar Belakang Masalah .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	3
I.3 Batasan Masalah .....	3
I.4 Tujuan Penelitian .....	3
I.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
II.1 Teknologi <i>Hydrogen Recovery</i> .....	5
II.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Sistem Membran Permeasi .....	11
II.3 Simulasi dan Pemodelan .....	11
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
III.1 Sistem yang Ditinjau .....	17
III.2 Model Matematika .....	18
III.3 Validasi Data .....	22
III.4 Variabel Penelitian .....	22
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
IV.1 Validasi Model .....	25
IV.2 Pengaruh Temperatur Feed Terhadap Persen Recovery .....	28
IV.3 Pengaruh Tekanan Feed Terhadap Persen Recovery ..	31
IV.4 Distribusi Konsentrasi pada Membran Permeasi .....	33
<b>BAB V KESIMPULAN</b> .....	35
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	vii
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	viii

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar II. 1</b>	Skema proses pemisahan dengan menggunakan PSA.....	7
<b>Gambar II. 2</b>	Skema proses pemisahan dengan menggunakan membran .....	8
<b>Gambar II. 3</b>	Mekanisme perpindahan secara molekular pada (a) pore-flow model dan (b) solution-diffusion model (Baker, 2004) .....	12
<b>Gambar II. 4</b>	Skema counter current flow pada membran (Geankoplis, 2003).....	12
<b>Gambar II. 5</b>	Skema representasi ukuran nominal pori dan model terbaik pada proses pemisahan (Baker, 2004) .....	15
<b>Gambar III. 1</b>	Alur rancangan penelitian secara umum .....	17
<b>Gambar III. 2</b>	Sistem Membran Permeasi untuk Pemisahan Gas H <sub>2</sub> dari Gas CH <sub>4</sub> .....	18
<b>Gambar IV. 1</b>	Pendekatan Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Polyimide dengan menggunakan persamaan Arrhenius .....	26
<b>Gambar IV. 2</b>	Validasi Model Simulasi dengan Hasil Eksperimen Ahmad, dkk (2012) .....	27
<b>Gambar IV. 3</b>	Hubungan antara Temperatur Feed Terhadap Persen Recovery Hidrogen .....	28
<b>Gambar IV. 4</b>	Hubungan Temperatur Feed Terhadap Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Membrane Polyetherimide .....	29
<b>Gambar IV. 5</b>	Hubungan Temperatur Feed Terhadap Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Membrane Polyimide .....	29
<b>Gambar IV. 6</b>	Hubungan Tekanan Feed Terhadap Persen Recovery Hidrogen .....	31
<b>Gambar IV. 7</b>	Distribusi Konsentrasi pada Membran Permeasi .....	34

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel II. 1</b>	Perbandingan Metode Pemurnian Hidrogen.....	10
<b>Tabel IV. 1</b>	Permeabilitas Gas Hidrogen dan Methana pada Temperatur 298 K.....	32

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam industri perminyakan, H<sub>2</sub> digunakan dalam proses *hydroprocessing* untuk meningkatkan kualitas bahan bakar dan meningkatkan jumlah produksi untuk memenuhi kebutuhan pasar. Konsumsi H<sub>2</sub> dalam *hydroprocessing* berdasarkan kandungan bahan baku dan proses pembuangan pengotor. Semakin berat hidrokarbon dan sulfur yang terkandung dalam bahan baku maka semakin banyak H<sub>2</sub> yang dikonsumsi untuk mencapai kuantitas dan kualitas produksi bahan bakar yang akan dicapai. (Ermawati, 2011)

Dewasa ini, kebutuhan gas H<sub>2</sub> mengalami pertumbuhan yang signifikan, dan diprediksikan akan mengalami peningkatan lebih jauh pada masa mendatang. Saat ini, produksi H<sub>2</sub> membutuhkan jumlah energi yang signifikan, yaitu sekitar 20% dari konsumsi energi kilang minyak. Maka dibutuhkan metode produksi yang hemat energi dan sumber yang baru sehingga biaya yang dibutuhkan dapat ditekan. ([www.inside.mines.edu](http://www.inside.mines.edu))

Pemisahan H<sub>2</sub> dari komponen hidrokarbon merupakan proses penting di dalam industri minyak dan gas alam. Teknologi pemisahan gas H<sub>2</sub> dari gas alam seperti metana, etana, propana dan hidrokarbon ringan lainnya untuk mendapatkan gas H<sub>2</sub> dengan kemurnian tinggi membutuhkan kondisi operasi optimal yang relatif tinggi sehingga proses produksi membutuhkan biaya operasional yang mahal.

Terdapat beberapa teknologi yang dapat diterapkan pada proses pemurnian gas hidrogen antara lain teknologi *Cryogenic* dan *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Teknologi *cryogenic* adalah suatu proses pemisahan komponen berdasarkan perbedaan titik didih yang dilakukan pada temperatur yang sangat rendah, sedangkan teknologi *pressure swing adsorption* (PSA) adalah proses pemurnian hidrogen dengan adsorpsi berdasarkan pada ikatan fisik dari molekul gas dengan material adsorber. Namun

biaya operasional dari kedua teknologi tersebut cenderung mahal sehingga kurang diaplikasikan pada industri.

Salah satu teknologi pemisahan  $H_2$  yang telah dikembangkan adalah membran permeasi. Membran permeasi merupakan salah satu aplikasi membran yang melibatkan pemisahan komponen tertentu berbasis perbedaan laju permeasi komponen melewati lapisan membran asimetrik. Oleh karena itu, permeat yang didapatkan melalui teknologi tersebut memiliki tingkat kemurnian  $<100\%$ . Salah satu contoh penerapan teknologi membran permeasi tersebut terdapat pada proses pemisahan  $CO_2$  dari natural gas, pemisahan  $H_2$  dari campuran  $H_2/CH_4$ , dsb.

Banyak faktor yang mempengaruhi kinerja suatu membran. Modelling dan simulasi pada proses pemisahan dengan teknologi membran merupakan cara yang sesuai untuk mengevaluasi performansi suatu membran, mendesain dan mendapatkan kondisi operasi terbaik guna meminimalisir biaya operasi (Ahsan dan Husein, 2016). Salah satu model yang diaplikasikan pada proses pemisahan gas adalah *solution-diffusion model*. Pada model tersebut, permeat dapat terpisah berdasarkan perbedaan solubilitas pada material membran dan perbedaan kecepatan difusi melalui material membran tersebut. Model ini dinilai lebih dapat menjelaskan mengenai fenomena perpindahan massa yang terjadi pada proses pemisahan gas dikarenakan solubilitas dari  $H_2/CH_4$  hampir sama sehingga untuk sistem perpindahan massa menggunakan perbedaan permeabilitas dari gas terhadap membrane sehingga menggunakan sistem membrane permease dimana membrane permease ini menggunakan *solution-diffusion model*. (Baker, 2004)

Dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut di atas, maka perlu dilakukan pemodelan dan simulasi proses pemisahan  $H_2/CH_4$  di dalam membran permeasi dan memvalidasi hasil yang didapatkan dengan hasil eksperimen.

## 1.2 Perumusan Masalah

Belum adanya pemodelan yang dapat menggambarkan peristiwa perpindahan massa gas  $H_2$  didalam campuran gas  $H_2/CH_4$  dengan menggunakan membrane permeasi.

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi masalah yang akan dibahas maka digunakan asumsi-asumsi berikut:

1. Sistem terdiri dari dua komponen, yaitu hidrogen dan methana.
2. Permeasi  $H_2$  terjadi pada kondisi *steady state*.
3. Properti-properti fisik dari fase gas bergantung pada temperatur dan mengasumsikan gas ideal.
4. Konstanta permeabilitas tidak bergantung pada tekanan.
5. Tekanan total konstan pada tiap sisi membran.
6. Tidak ada gradien konsentrasi pada arah perpendikular membran.
7. Ketebalan membran seragam.
8. Reaksi berlangsung dengan kondisi *isothermal*.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Membuat model matematik pada proses pemisahan gas  $H_2$  di dalam *hollow fibre membrane*.
2. Melakukan validasi hasil prediksi model matematik dengan data eksperimen.
3. Mempelajari pengaruh berbagai parameter proses seperti temperatur feed, tekanan feed, dan material membran terhadap efisiensi pemisahan.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini, akan dihasilkan suatu model matematik yang dapat menggambarkan proses pemisahan  $H_2/CH_4$  di dalam membran permeasi, yang digunakan untuk mengkaji secara teoritis dan memprediksi pengaruh berbagai variabel

proses terhadap efisiensi pemisahan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan oleh industri untuk merancang unit *hydrogen recovery* dalam menganalisa dan mengoptimasi kinerja unit tersebut.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Hidrogen dimanfaatkan dalam suatu kilang perminyakan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas bahan bakar yang dihasilkan. Konsumsi hidrogen dalam *hydroprocessing* akan berbanding lurus dengan berat dari hidrokarbon dan sulfur yang terkandung dalam bahan baku (Ermawati, 2011). Kebutuhan hidrogen yang tinggi tersebut membutuhkan energi dengan jumlah yang cukup tinggi pula, hingga mencapai 20% dari konsumsi energi total dalam suatu kilang minyak. Sehingga dibutuhkan suatu metode produksi yang diharapkan dapat menekan biaya produksi seminimal mungkin. ([www.inside.mines.edu](http://www.inside.mines.edu))

Di dalam proses pemisahan gas, terdapat beberapa pilihan teknologi yang digunakan pada pemurnian *hydrogen* dalam suatu komponen hidrokarbon antara lain: teknologi *cryogenic*, teknologi *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dan teknologi membran permeasi (Grashoff, 1983). Masing-masing teknologi pemurnian  $H_2$  tersebut memiliki parameter yang berbeda agar  $H_2$  yang dihasilkan memiliki kemurnian tinggi.

#### **II.1 Teknologi *Hydrogen Recovery***

Terdapat beberapa teknologi yang dapat diterapkan pada proses pemurnian gas hidrogen, antara lain:

1. Teknologi *Cryogenic*

Teknologi *cryogenic* adalah suatu proses pemisahan komponen berdasarkan perbedaan titik didih yang dilakukan pada temperatur yang sangat rendah. Proses pemisahan dengan distilasi kriogenik bertumpu pada suatu asumsi bahwa semua komponen yang terdapat pada gas alam dapat dihilangkan kecuali gas  $H_2$  dan hidrokarbon. Setelah komponen lain dipisahkan dari gas alam (misal  $CO_2$  dan  $H_2S$ ), komponen sisa akan dialirkan ke dalam *chamber* kriogenik dimana temperatur dan tekanan diatur sedemikian

rupa untuk membuat hidrokarbon mencair pada kondisi yang tepat, sementara H<sub>2</sub> tetap dalam fase gas. Gas H<sub>2</sub> keluar dari bagian atas dari *chamber* kriogenik sedangkan hidrokarbon cair terakumulasi pada bagian bawah *chamber*.

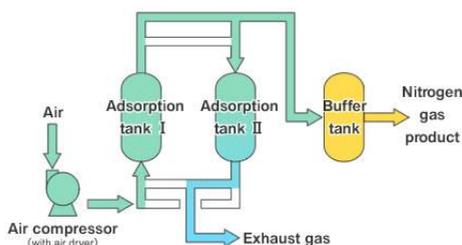
Keuntungan utama dari proses distilasi kriogenik dibandingkan proses pemisahan lainnya adalah tingkat kemurnian H<sub>2</sub> yang diperoleh tinggi >95% dan hidrokarbon yang terpisah berada dalam fase cair sehingga pemindahan dan penanganan zat lebih mudah. Namun proses kriogenik memiliki kekurangan, yaitu kebutuhan energi yang sangat tinggi untuk mempertahankan sistem tetap dingin dan diperlukan *pre-treatment* agar zat yang memasuki *chamber* hanya H<sub>2</sub> dan hidrokarbon. Komponen-komponen lain seperti O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> harus dihilangkan terlebih dahulu, karena jika zat seperti air (H<sub>2</sub>O) memasuki aliran maka zat ini akan membeku dan dapat menghambat perpipaan serta dapat menyebabkan terjadinya korosi.

## 2. Teknologi *Pressure Swing Adsorption* (PSA)

Teknologi *pressure swing adsorption* (PSA) adalah proses pemurnian hidrogen dengan adsorpsi berdasarkan pada ikatan fisik dari molekul gas dengan material adsorber. Kekuatan masing-masing antara molekul gas dan material adsorber tergantung kepada komponen gas umpan, tipe material adsorber, tekanan parsial dari komponen gas dan temperatur operasi (Thomas, 1998). Proses ini digunakan secara ekstensif untuk pemurnian gas H<sub>2</sub> yang mengandung sejumlah kecil hidrokarbon dengan berat molekul rendah.

Menurut Qian Xiaojing (2012) untuk memisahkan campuran gas He/H<sub>2</sub> digunakan adsorber berupa molecular sieve yang memiliki ukuran 5Å dengan bentuk bulat berdiameter 3-5 mm. Molecular sieve dipilih karena bahan ini mampu menyerap dan melepas dengan cepat. Selain itu kuantitas hidrogen yang teradsorpsi tinggi dan kapasitas keadaan jenuh berkisar 15,69 ml/g pada tekanan 0,2 MPa.

Sedangkan Donghui Zhang (2002) menyatakan bahwa dengan temperatur sebesar 77 K, tingkat kemurnian hidrogen yang didapatkan >90% komponen murni dengan umpan yang mengandung 0,5% hidrogen. Hwa Jhung, dkk (2005) dalam penelitiannya menyatakan bahwa adsorpsi menggunakan porous material SAPO-34 dapat menyerap H<sub>2</sub> sebesar 160 ml/g pada temperatur 77 K dan tekanan 1 atm karena memiliki area permukaan, volume pori mikro yang besar dan ukuran diameter pori mikro yang sempit.



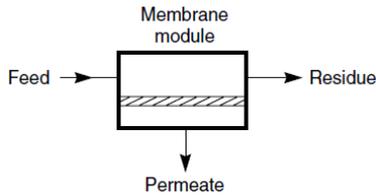
**Gambar II. 1** Skema proses pemisahan dengan menggunakan PSA

### 3. Teknologi Membran Permeasi

Membran dapat digambarkan sebagai suatu lapisan yang terdapat di antara dua fasa fluida yakni fasa pada *feed* dan fasa permeat yang bersifat sebagai penghalang (*barrier*) terhadap suatu spesi tertentu. Membran dapat memisahkan zat dengan ukuran yang berbeda serta membatasi transpor berdasarkan sifat fisik dan kimianya. Sifat semipermeabel pada membran yakni berarti membran dapat menahan spesi-spesi tertentu yang lebih besar dari ukuran pori membran dan melewatkan spesi-spesi lain dengan ukuran lebih kecil. Membran juga memiliki sifat yakni selektivitas sehingga dapat digunakan dalam proses pemisahan suatu gas tertentu. (Kohl, 1997)

Proses pemisahan dengan membran dapat terjadi karena adanya *driving force* dalam umpan berupa beda tekanan ( $\Delta P$ ),

beda konsentrasi ( $\Delta C$ ), beda potensial listrik ( $\Delta E$ ), dan beda temperatur ( $\Delta T$ ). Berikut merupakan skema proses pemisahan dengan menggunakan membran.



**Gambar II. 2** Skema proses pemisahan dengan menggunakan membran

(Kohl, 1997)

Membran dapat dibuat dari bahan alami yang berasal langsung dari alam seperti pulp dan kapas, maupun dari bahan sintetis yang dibuat dari bahan kimia seperti polimer. Membran juga dapat dibuat dari polimer alam (organik) dan polimer anorganik. Peran dari membran yakni memisahkan material berdasarkan ukuran dan bentuk molekul, menahan komponen dari umpan yang mempunyai ukuran lebih besar dari pori-pori membran dan melewatkan komponen yang mempunyai ukuran yang lebih kecil. Selain sebagai media pemisahan, membran juga berfungsi sebagai sarana pemekatan dan pemurnian dari suatu larutan yang dilewatkan pada membran tersebut.

Dalam proses pemisahan gas dengan menggunakan membran, permeabilitas dan selektivitas merupakan dua parameter penting untuk mengetahui performa dari suatu membran. Permeabilitas merupakan kecepatan permeasi yang diartikan sebagai volume yang melewati membran persatuan luas dalam satuan waktu tertentu dengan gaya penggerak berupa tekanan. Permeasi ( $R$ ) dapat menyatakan permeabilitas suatu membran yang dapat dituliskan dari persamaan 2.1 sebagai berikut :

$$R_i = \frac{Q_i}{\Delta P_i A} \quad (2.1)$$

dimana  $Q_i$  merupakan *flux* dari suatu spesies gas  $i$  pada temperatur dan tekanan standar (STP),  $\Delta P_i$  adalah perbedaan tekanan parsial *transmembrane* dari suatu gas  $i$ , dan  $A$  menyatakan luasan area membran. Satuan dari permeasi adalah *Gas Permeance Unit* (GPU). (Panyuan, 2015)

Selektifitas menggambarkan kemampuan membran untuk memisahkan suatu jenis spesi yang dinyatakan oleh 2 parameter yaitu tolakan ( $R$ ) dan faktor pemisahan ( $\alpha$ ). Parameter tolakan berlaku pada sistem pemisahan padat-cair, sedangkan faktor pemisahan ditentukan pada sistem pemisahan gas-gas dan cair-cair. Penentuan tolakan dapat dinyatakan oleh persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_b}\right) \times 100\% \quad (2.2)$$

$C_p$  merupakan konsentrasi zat terlarut di dalam permeat dan  $C_b$  adalah rata-rata konsentrasi zat terlarut di dalam *feed* dan retentat, dimana konsentrasi permeat dan retentat dapat diukur dengan menggunakan spektrofotometri sinar tampak. (Panyuan, 2015)

Keuntungan dari teknologi membran permeasi untuk proses pemisahan gas antara lain: (Schell, 1983)

- ✓ Biaya investasi rendah
- ✓ Kemudahan dalam pengoperasian
- ✓ Efisiensi tempat atau area
- ✓ Kemudahan *scale up*
- ✓ Peralatan yang dibutuhkan lebih sedikit
- ✓ Keseluruhan bagian bersifat statis
- ✓ Kemudahan dalam instalasi
- ✓ Fleksibilitas tinggi
- ✓ Utilitas yang dibutuhkan dalam jumlah yang kecil
- ✓ Pengaruh lingkungan rendah
- ✓ Reliabilitas

Namun teknologi membran juga mempunyai kelemahan yaitu fluks dan selektifitas. Pada proses pemisahan gas dengan menggunakan membran terjadi perbedaan yang berbanding terbalik antara fluks dan selektifitas. Semakin

tinggi fluks berakibat menurunnya selektifitas pada membran, sedangkan yang paling diharapkan pada membran adalah dapat mempertinggi fluks dan selektifitas dari kinerja membran tersebut.

Dari ketiga teknologi untuk pemurnian gas H<sub>2</sub> tersebut, terdapat beberapa parameter yang dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk memilih teknologi yang paling efisien, yang telah disajikan dalam tabel sebagai berikut: (Sinha, 2010)

**Tabel II. 1** Perbandingan Metode Pemurnian Hidrogen

Parameter	Teknologi Pemurnian Hidrogen		
	PSA	Membran	Distilasi Kriogenik
% H <sub>2</sub> minimal dalam <i>feed</i>	50	15	15
Kapasitas H <sub>2</sub> (KNm <sup>3</sup> /h)	0.1 – 100	0.5 – 70	5 – 1000
Tekanan <i>feed</i> (bar)	10 – 65	15 - 120	10 – 80
Tekanan produk H <sub>2</sub> (bar)	Mendekati tekanan <i>feed</i>	< 1/3 dari tekanan <i>feed</i>	Mendekati tekanan <i>feed</i>
<i>Pretreatment</i> untuk <i>feed</i>	Tidak perlu	Perlu	Perlu
Kemurnian H <sub>2</sub> (% volume)	99.9	98	97
<i>Recovery</i> H <sub>2</sub> (%)	90	95	98
Fleksibilitas	+++	++	+
Ketahanan	++	+++	+
<i>Cost</i>	Menengah	Kecil	Tinggi

## II.2 Pengaruh Temperatur Terhadap Sistem Membran Permeasi

Perpindahan massa gas hidrogen pada campuran hidrogen-methana berdasarkan perbedaan permeabilitas dari kedua komponen melalui suatu membran. Permeabilitas hidrogen lebih besar daripada permeabilitas methana sehingga kadar hidrogen pada permeat lebih besar dibandingkan pada retentat dan sebaliknya. Nilai permeabilitas komponen tersebut bergantung pada temperatur komponen tersebut. Acharya (2004) mengemukakan korelasi antara perubahan temperature dengan nilai permeabilitas suatu zat yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$P = P_0 \exp(-E_p/RT) \quad (2.3)$$

dimana  $P_0$  adalah permeabilitas zat pada temperatur  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $E_p$  adalah energi activasi permeasi,  $R$  adalah konstanta tetapan gas,  $T$  adalah Temperatur zat. Sedangkan Untuk energi aktivasi permeasi zat tersebut dapat diketahui dari persamaan 2.4 sebagai berikut:

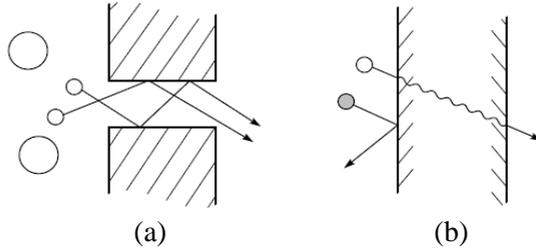
$$E_p = D_e + S_e \quad (2.4)$$

dimana  $D_e$  adalah energi aktivasi difusi dan  $S_e$  adalah energi aktivasi kelarutan. (Acharya, 2004)

## II.3 Simulasi dan Pemodelan

Modelling dan simulasi pada proses pemisahan dengan teknologi membran merupakan cara yang sesuai untuk mengevaluasi performansi suatu membran, mendesain dan mendapatkan kondisi operasi terbaik guna meminimalisir biaya operasi. (Ahsan dan Husein, 2016)

Terdapat dua model yang digunakan untuk menggambarkan mekanisme permeasi pada membran, seperti yang digambarkan pada gambar II.2 sebagai berikut : (Baker, 2004)



**Gambar II. 3** Mekanisme perpindahan secara molekular pada (a) pore-flow model dan (b) solution-diffusion model (Baker, 2004)

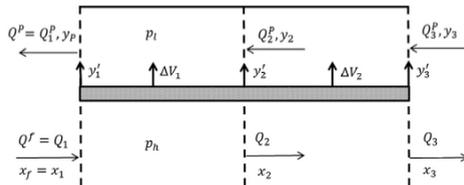
### II.3.1 *Solution-Diffusion Model*

Salah satu model yang diaplikasikan pada proses pemisahan gas adalah *solution-diffusion model*. Pada model tersebut, permeat dapat terpisah berdasarkan perbedaan solubilitas pada material membran dan perbedaan kecepatan difusi melalui material membran tersebut. Model ini dinilai lebih dapat menjelaskan mengenai fenomena perpindahan massa pada proses pemisahan gas.

Difusi, yang merupakan basis pada *solution-diffusion model*, adalah proses dimana suatu zat berpindah dari suatu bagian dari sistem ke bagian lain berdasarkan gradien konsentrasi. Fick mengemukakan suatu formula yang dapat menjelaskan mengenai fenomena difusi, yang lebih dikenal dengan Hukum Fick.

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (2.5)$$

dimana  $J_i$  adalah laju perpindahan komponen  $i$  atau fluks,  $dc_i/dx$  adalah gradien konsentrasi komponen  $i$  sepanjang  $x$  dan  $D_i$  adalah koefisien difusivitas. (Geankoplis, 2003)



**Gambar II. 4** Skema counter current flow pada membran (Geankoplis, 2003)

Feed dengan spesifik flow rate  $Q^f$  memasuki unit membran dan terpisah menjadi dua stream baru, yaitu  $Q^p$  pada sisi permeat dan  $Q^0$  yang meninggalkan sisi residu. Maka persamaan neraca massa totalnya adalah:

$$Q^f = Q^p + Q^0 \quad (2.6)$$

Sedangkan neraca massa komponen ditunjukkan oleh persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$Q^f \cdot x_f = Q^p \cdot y_p + Q^0 \cdot x_0 \quad (2.7)$$

Stage cut didefinisikan sebagai perbandingan antara flow rate permeat dengan flow rate feed yang ditunjukkan oleh persamaan 2.8 sebagai berikut:

$$\theta = \frac{Q^p}{Q^f} = \frac{Q^f - Q^0}{Q^f} \quad (2.8)$$

Adapun faktor pemisahan ideal, selektivitas ( $\alpha$ ) dan *pressure ratio* ( $\gamma$ ) ditunjukkan oleh persamaan 2.9 dan 2.10 berikut:

$$\alpha = \frac{P_a}{P_b} \quad (2.9)$$

$$\gamma = \frac{p_l}{p_h} \quad (2.10)$$

Dimana  $P_a$  adalah permeabilitas gas A,  $P_b$  adalah permeabilitas gas B,  $p_l$  adalah tekanan rendah pada sisi permeat dan  $p_h$  adalah tekanan tinggi pada sisi feed. Dengan menggunakan metode *finite difference* dan mengacu pada increment  $\Delta A_m$ , neraca massa pada kedua sisi dapat dituliskan menjadi persamaan 2.11 sebagai berikut :

$$\Delta Q^p = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.11)$$

dimana  $\Delta Q^p$ ,  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$  berturut-turut adalah flow rate permeat pada increment, flowrate yang memasuki increment dan flowrate yang meninggalkan increment. Untuk menghitung luas area pada aliran counter-current maupun co-current, digunakan persamaan berikut: (Ahsan dan Husein, 2016)

$$\frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\Delta A_m} = \left( \frac{P_A}{t} \right) P_h (x - \gamma y')_{av} \quad (2.12)$$

Average driving force ditunjukkan:

$$(x - \gamma y')_{av} = [(x_{in} - \gamma y'_{in}) + (x_{out} - \gamma y'_{out})]/2 \quad (2.13)$$

Sehingga  $\Delta A_m$ :

$$\Delta A_m = \frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\left(\frac{PA}{t}\right) P_h(x-\gamma y')_{av}} \quad (2.14)$$

### II.3.2 *Pore-flow Model*

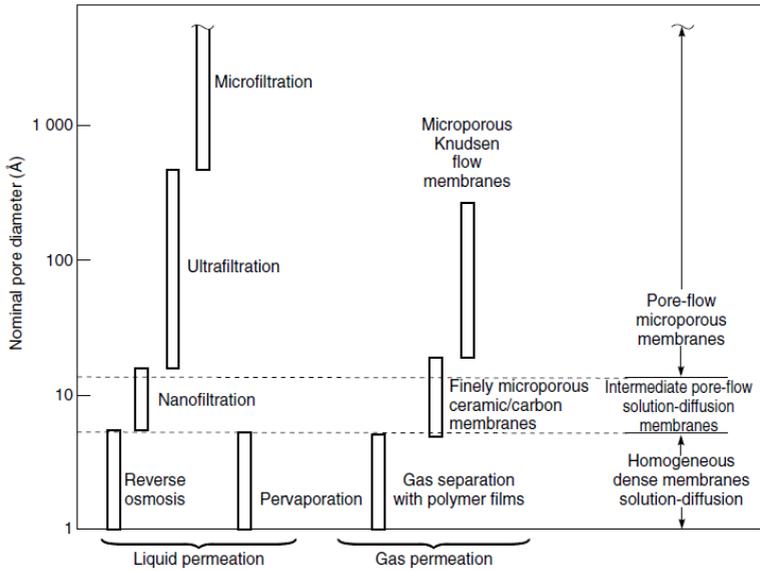
Model lain yang digunakan pada proses pemisahan dengan menggunakan membran adalah *pore-flow model*. Permeat mengalir berdasarkan perbedaan tekanan aliran konvektif melalui pori membran. Permeat terpisah karena molekul permeat lolos melalui pori membran sedangkan molekul retentat tidak.

Tekanan aliran konvektif, yang merupakan basis dari *pore-flow model*, digunakan untuk menggambarkan aliran pada media berkapiler atau berpori. Persamaan dasar yang digunakan pada model ini adalah Hukum Darcy, yang dapat dituliskan dengan persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$J_i = -K' c_i \frac{dp}{dx} \quad (2.15)$$

dimana  $dp/dx$  adalah gradien tekanan sepanjang pori media,  $c_i$  adalah konsentrasi komponen  $i$  pada media, dan  $K'$  adalah koefisien refleksi media. (Geankoplis, 2003)

Perbedaan antara *solution-diffusion model* dan *pore-flow model* terdapat pada ukuran relatif pori pada membran. Berikut adalah skema yang menunjukkan hubungan ukuran pori dengan penggunaan model yang sesuai pada proses pemisahan dengan membran. (Baker, 2004)

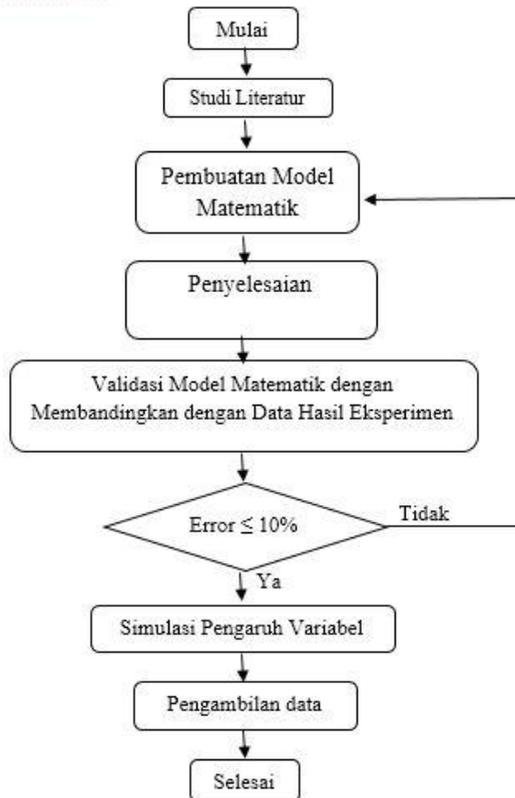


**Gambar II. 5** Skema representasi ukuran nominal pori dan model terbaik pada proses pemisahan (Baker, 2004)

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

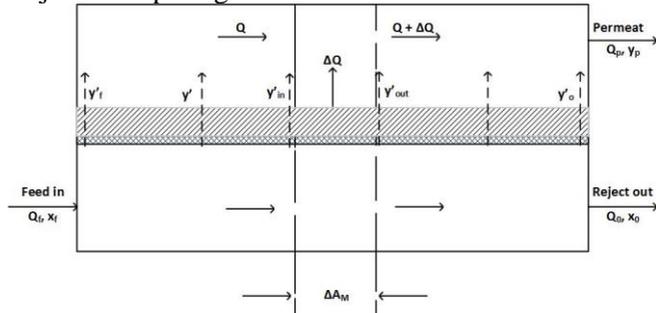
Penelitian ini dilakukan secara teoritis dengan mengembangkan model matematik proses pemisahan gas  $H_2/CH_4$  di dalam *hollow fibre membrane* dalam kondisi isothermal. Simulasi ini bisa digunakan untuk merancang membran dan melakukan optimasi pengoperasian unit membran. Langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



**Gambar III. 1** Alur rancangan penelitian secara umum

### III.1 Sistem yang Ditinjau

Sistem yang ditinjau adalah sistem membran permeasi yang ditunjukkan seperti gambar berikut :



**Gambar III. 2** Sistem Membran Permeasi untuk Pemisahan Gas H<sub>2</sub> dari Gas CH<sub>4</sub>

### III.2 Model Matematika

#### III.2.1 Persamaan Neraca Massa

Tipe aliran membran yang digunakan adalah cocurrent dimana arah aliran feed searah dengan arah aliran permeat seperti yang ditunjukkan pada Gambar III.2.  $Q_f$  adalah flow rate gas yang masuk dalam system,  $Q_p$  merupakan pada sisi permeat, sedangkan  $Q_0$  merupakan aliran yang meninggalkan system sebagai retentat.

Sehingga persamaan Neraca massa total dapat dituliskan dengan persamaan 3.1 sebagai berikut :

$$Q_f = Q_p + Q_0 \quad (3.1)$$

Berdasarkan neraca massa dapat dituliskan neraca komponen gas yang akan dipisahkan.

$$Q_f x_f = Q_p y_p + Q_0 x_0 \quad (3.2)$$

dimana  $Q_f$  adalah laju alir feed,  $x_f$  adalah fraksi gas dalam aliran feed,  $Q_0$  adalah laju alir retentate,  $x_0$  adalah fraksi gas dalam aliran retentate  $Q_p$  adalah laju alir permeat, dan  $y_p$  adalah fraksi gas dalam aliran permeat.

Untuk persamaan neraca massa di setiap increment dapat dituliskan dengan persamaan 3.3 sebagai berikut:

$$\Delta Q y'_{av} = Q_{in}x_{in} - Q_{out}x_{out} \quad (3.3)$$

dimana,

$$y'_{av} = (y_{in} + y_{out})/2 \quad (3.4)$$

Sedangkan Rasio aliran permeat dari feed atau biasa disebut dengan stage cut dapat dituliskan dengan persamaan 3.5 sebagai berikut :

$$\theta = \frac{Q_p}{Q_f} = \frac{Q_f - Q_0}{Q_f} \quad (3.5)$$

(Geankoplis, 2003)

### III.2.3 Pemodelan *Solution-Diffusion* pada Membran Permeasi

Penelitian ini menggunakan pemodelan *solution-diffusion* dengan asumsi tertentu untuk memperkirakan fenomena transfer massa yang terjadi pada proses pemisahan hidrogen dari campuran hidrogen-metana. Asumsi-asumsi yang ditetapkan pada pembuatan model matematik ini adalah sebagai berikut :

- Nilai permeabilitas gas sama seperti nilai permeabilitas spesies murninya
- Permeabilitas yang telah ditentukan independen terhadap tekanan
- System steady state
- Ketebalan membran seragam
- Tekanan total konstan pada setiap bagian membrane
- Tidak ada gradien konsentrasi pada arah tegak lurus dari membran
- Aliran plug
- Reaksi berlangsung dengan kondisi *isothermal*

Nilai fluks gas A yang terdifusi melalui membran dapat ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$N_A = \frac{D_{AB} S}{L (22,414)} (p_{A1i} - p_{A2i}) \quad (3.8)$$

dimana  $D_{AB}$  adalah difusifitas gas A terhadap solid (m/s), S adalah kelarutan dari A ( $m^3$ ), L adalah ketebalan dari membrane

(m), sedangkan  $p_{A1i}$  dan  $p_{A2i}$  berturut-turut adalah tekanan partial dari gas A pada sisi feed dan sisi permeat.

Menurut Rousseau (1987), permeabilitas ( $P_M$ ) dapat didefinisikan sebagai :

$$P_M = D_{AB} S \frac{1}{22.414} \frac{m^3(STP) \cdot m}{s \cdot m^2 C \cdot S \cdot atm} = D_{AB} S \frac{kmol \cdot m}{s \cdot m^2 C \cdot S \cdot atm} \quad (3.9)$$

(Rousseau, 1987)

Nilai permeabilitas tersebut dipengaruhi oleh temperatur sehingga dibuat persamaan untuk pendekatan pengaruh temperatur terhadap permeabilitas dengan menggunakan persamaan Arrhenius sebagai berikut :

$$P = P_0 \exp(-E_p/RT) \quad (3.10)$$

Persamaan diatas digunakan untuk memprediksi nilai permeabilitas pada *solution diffusion* model. Berdasarkan persamaan Arrhenius, nilai permeabilitas bergantung pada nilai permeabilitas standar, energi aktivasi permeasi, dan temperatur. Adapun nilai energi aktivasi permeasi ( $E_p$ ) tersebut didapatkan dari pengolahan data eksperimen (Kong, 2015) untuk gas hidrogen dan methana. Persamaan Arrhenius diubah menjadi bentuk logaritmik sehingga terbentuk persamaan garis lurus. Garis tersebut merupakan regresi dari data eksperimen terkait sehingga didapatkan nilai energi aktivasi permeasi yang merupakan slope garis tersebut.

$$\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = -\frac{E_p}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (3.11)$$

Sehingga persamaan jumlah fluks untuk membran permeasi dapat ditulis ulang menjadi:

$$N_A = \frac{P_M}{L} (p_{A1i} - p_{A2i}) \quad (3.12)$$

Sedangkan fluks dari spesies A pada komponen biner ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\frac{Q_A}{A_m} = \frac{Q_p y_p}{A_m} = \left(\frac{P'_A}{L}\right) (p_h x_0 - p_l y_p) \quad (3.13)$$

Sedangkan untuk jumlah flux gas B adalah sebagai berikut:

$$\frac{Q_B}{A_m} = \frac{Q_p(1-y_p)}{A_m} = \left(\frac{P'_B}{L}\right) [p_h(1-x_0) - p_l(1-y_p)] \quad (3.14)$$

Eliminasi persamaan (3.9) dan (3.10) menghasilkan:

$$\frac{y^l}{1-y^l} = \frac{\alpha^* [x_i - r y^l]}{(1-x_i) - r (1-y^l)} \quad (3.15)$$

dimana  $\alpha^*$  adalah Selektivitas,  $r$  adalah rasio tekanan pada aliran masuk feed dan aliran permeat, dan  $x_i$  adalah fraksi hidrogen di feed. (Geankoplis, 2003)

Persamaan (3.13) merupakan persamaan kuadrat yang dapat diselesaikan dengan:

$$y^l = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.16)$$

Dimana:

$$a = 1 - \alpha^* \quad (3.17)$$

$$b = -1 + \alpha^* + \frac{1}{r} + \frac{x_i}{r} (\alpha^* - 1) \quad (3.18)$$

$$c = \frac{-\alpha^* x_i}{r} \quad (3.19)$$

Selektivitas didefinisikan sebagai perbandingan antara permeabilitas A dengan permeabilitas B terhadap membrane yang digunakan, yang dapat ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\alpha^* = \frac{P_A}{P_B} \quad (3.20)$$

dimana  $P_A$  adalah permeabilitas gas A dan  $P_B$  adalah permeabilitas gas B. Untuk rasio tekanan pada sistem merupakan perbandingan tekanan dari tekanan rendah di aliran permeat ( $p_l$ ) dengan tekanan tinggi di aliran feed ( $p_h$ ) dapat dituliskan dengan persamaan 3.21 sebagai berikut :

$$r = \frac{p_l}{p_h} \quad (3.21)$$

Flowrate permeat pada tiap increment dihitung dengan persamaan (3.3) yang dapat ditulis ulang sebagai berikut:

$$\Delta Q = \frac{Q_f(x_f - x_o)}{(y'_{av} - x_o)} \quad (3.22)$$

Sehingga Flowrate total permeat yang dihasilkan dapat dituliskan dengan persamaan 3.23 sebagai berikut :

$$Q^p = \Sigma \Delta Q \quad (3.23)$$

dimana  $Q^p$  adalah flowrate permeat total ( $m^3/s$ ) yang merupakan jumlah dari flowrate permeat yang dihasilkan pada setiap

increment. Sedangkan untuk menghitung flowrate retentate, digunakan persamaan (3.2) yang dapat ditulis ulang menjadi:

$$Q_0 = \frac{Q_f x_f - Q_p y_p}{x_0} \quad (3.24)$$

Untuk penentuan komposisi di aliran retentate digunakan penurunan rumus dari persamaan (2.11) dan (2.12) sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta A_m = \frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\left(\frac{P_A}{t}\right) P_h [2x_{in} - \Delta x - r y'_{in} - r y'_{out}] / 2} \quad (3.25)$$

Berdasarkan persamaan (3.25) dengan trial  $\Delta x$  hingga mendapatkan jumlah luas membrane setiap increment sesuai dengan luas membrane yang telah ditentukan. Nilai fraksi output terakhir dari increment yang nilai luas membrannya sesuai dengan luas membrane yang telah ditentukan merupakan fraksi retentate total dari sistem membrane permeasi.

Untuk penentuan persen recovery dari gas Hidrogen yang dihasilkan dari pemisahan dari Methana dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\% \text{Recovery} = \frac{Q_p y_p}{Q_f x_f} \times 100\% \quad (3.26)$$

(Ahsan dan Husein, 2016)

### III.3 Validasi Data

Validasi dilakukan dengan cara membandingkan data hasil prediksi simulasi dengan data eksperimen yang telah dilakukan Fauzan Ahmad (2012).

### III.4 Variabel Penelitian

#### III.4.1 Sistem yang dipelajari

Modul Membran : *Hollow fiber membrane*

Luas Membran : 1000 m<sup>2</sup>

#### III.4.2 Variabel tetap

- Laju alir gas masuk (total): 2640 Nm<sup>3</sup>/jam
- Tekanan Permeat : 1 atm

- Fraksi mol komponen feed gas masuk:
  - H<sub>2</sub> : 76.44%
  - CH<sub>4</sub> : 23.56%

#### **III.4.3 Variabel berubah**

- Temperatur operasi (K) : 298 - 373.
- Tekanan operasi (bar) : 3 - 101.
- Bahan membran : Polyimide (PI), Polyetherimide (PEI), Polysulfone (PSf), Polystyrene (PStr), Cellulose acetate (CA).

#### **III.4.4 Variabel respons (output)**

- % H<sub>2</sub> *recovery*
- Distribusi konsentrasi komponen pada *hollow fibre membrane*

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini dilakukan simulasi proses pemisahan sistem biner hidrogen-methana dengan menggunakan model *solution-diffusion*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara teoritis keterkaitan antara kondisi operasional yang digunakan pada proses pemisahan gas hidrogen dalam campuran hidrogen-methana melalui membran permeasi. Performa membran permeasi yang dinyatakan dalam persen recovery dipengaruhi oleh temperatur feed dan tekanan feed di dalam sisi tube membran hollow fiber. Sebagai batasan masalah, digunakan asumsi sebagai berikut:

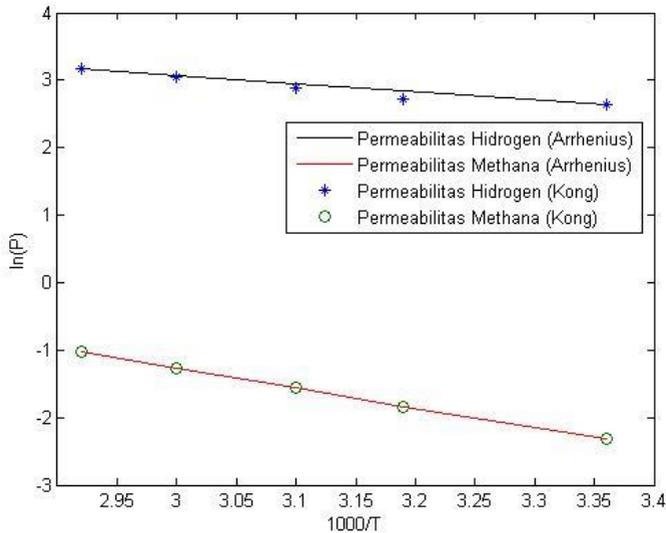
1. sistem terdiri dari dua komponen, yaitu hidrogen dan methana,
2. permeasi  $H_2$  terjadi pada kondisi *steady state*,
3. properti-properti fisik dari fase gas bergantung pada suhu dan mengasumsikan gas ideal,
4. konstanta permeabilitas tidak bergantung pada tekanan,
5. tekanan total konstan pada tiap sisi membran, tidak ada gradien konsentrasi pada arah tegak lurus membran,
6. ketebalan membran seragam dan reaksi berlangsung dengan kondisi isothermal.

Simulator yang digunakan pada penelitian ini adalah MATLAB versi 8.1. Adapun variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: temperatur feed, tekanan feed, dan material membran.

#### **IV. 1. Validasi Model**

Permeabilitas merupakan parameter utama yang menentukan kinerja dari membran permeasi. Pada penelitian ini, digunakan persamaan Arrhenius untuk memprediksi nilai permeabilitas hidrogen dan methana pada membran pada suhu

tertentu. Data permeabilitas yang digunakan adalah data eksperimen yang telah dilakukan oleh Ying Kong, dkk (2015). Hasil perbandingan persamaan Arrhenius dengan data eksperimen dapat ditunjukkan pada **Gambar IV.1**.



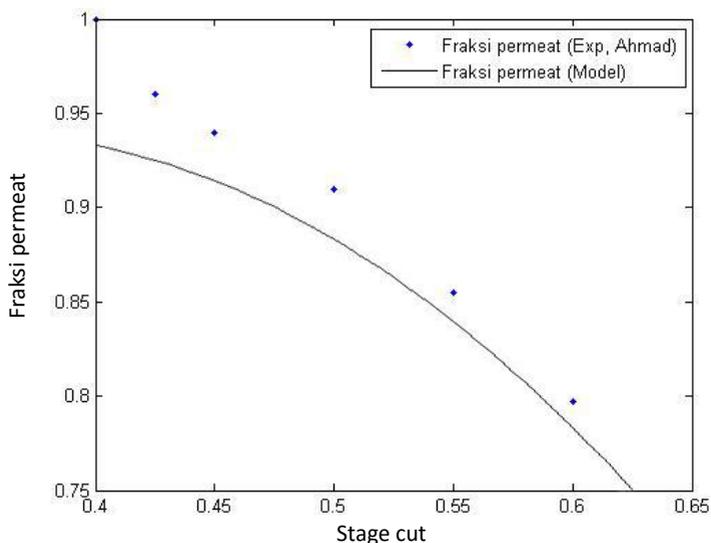
**Gambar IV. 1** Pendekatan Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Polyimide dengan menggunakan persamaan Arrhenius

**Gambar IV.1** menunjukkan bahwa kenaikan temperatur feed menyebabkan kenaikan nilai permeabilitas hidrogen, namun nilai permeabilitas methana tidak mengalami perubahan yang signifikan terhadap kenaikan temperatur feed. Ying Kong, dkk (2015) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa terjadi kenaikan permeabilitas gas hidrogen terhadap kenaikan temperatur feed.

Melalui pendekatan Arrhenius, didapatkan nilai permeabilitas gas hidrogen dan methana sebagai fungsi temperatur feed dengan persen error berturut-turut sebesar 1.77% dan 0.93%. Selanjutnya, persamaan Arrhenius, dengan persen error tersebut di atas, digunakan untuk memprediksi permeabilitas hidrogen dan methana pada penelitian ini. Nilai permeabilitas

yang didapatkan akan digunakan dalam simulasi untuk mengetahui kinerja dari membran permeasi.

Dalam penelitian ini, perpindahan massa yang terjadi diilustrasikan sesuai model *solution-diffusion*, dimana peristiwa perpindahan massa sangat bergantung pada kelarutan dan difusivitas gas. Mula-mula partikel gas larut di permukaan membran, kemudian berdifusi melalui membran menuju sisi yang lain. Hasil simulasi proses pemisahan hidrogen/methana dibandingkan dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Fauzan Ahmad, dkk (2012). Hasil perbandingan simulasi dengan eksperimen Fauzan Ahmad dapat ditunjukkan pada **Gambar IV.2**.



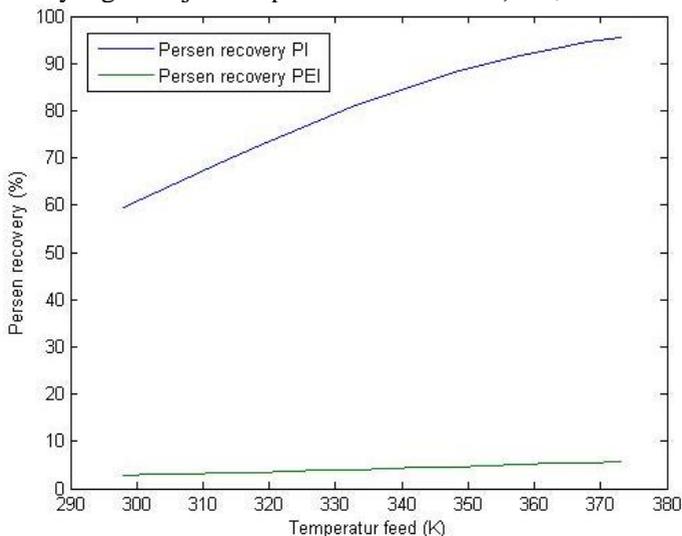
**Gambar IV. 2** Validasi Model Simulasi dengan Hasil Eksperimen Ahmad, dkk (2012)

**Gambar IV.2** adalah perbandingan model simulasi dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh Fauzan Ahmad, dkk (2012). Stage cut adalah perbandingan antara flowrate feed dengan flowrate permeat. Dari gambar tersebut

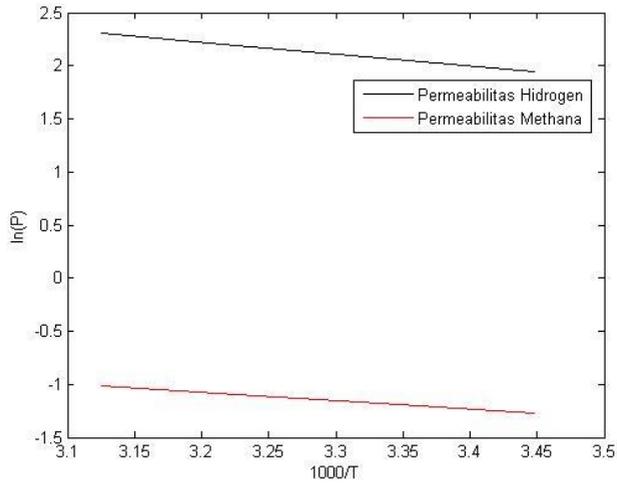
dapat dilihat bahwa model simulasi mendekati hasil eksperimen pada stage cut yang tinggi dengan persen error rata-rata sebesar 2.49%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi dapat menggambarkan fenomena perpindahan massa pada *hollow fiber membrane* berkapasitas besar dengan tingkat akurasi yang semakin baik.

#### IV. 2. Pengaruh Temperatur Feed Terhadap Persen Recovery

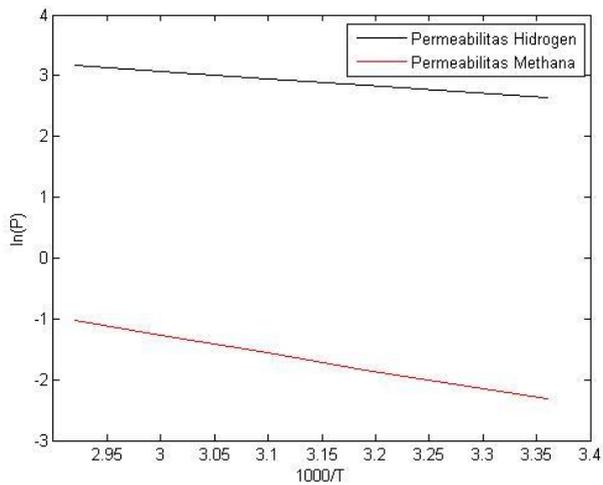
Pada persamaan Arrhenius, temperatur feed mempengaruhi nilai permeabilitas dari gas sehingga memungkinkan terjadinya perubahan persen recovery dari sistem membrane permease terhadap perubahan temperature dari feed tersebut. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan hubungan antara temperatur feed terhadap persen recovery dimana yang ditunjukkan pada **Gambar IV.3, 4.4, dan 4.5**.



**Gambar IV. 3** Hubungan antara Temperatur Feed Terhadap Persen Recovery Hidrogen ( $P_T=35$  atm,  $P_S=1$  atm,  $A= 1000$  m<sup>2</sup>, fraksi H<sub>2</sub> feed= 0.7644, balanced CH<sub>4</sub>)



**Gambar IV. 4** Hubungan Temperatur Feed Terhadap Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Membrane Polyetherimide



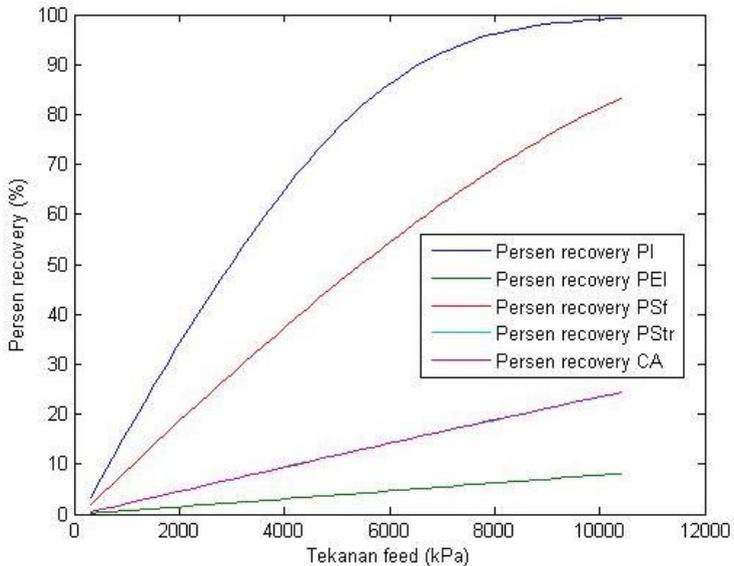
**Gambar IV. 5** Hubungan Temperatur Feed Terhadap Permeabilitas Hidrogen dan Methana pada Membrane Polyimide

**Gambar IV.3** menunjukkan bahwa peningkatan temperatur feed berimplikasi pada peningkatan %recovery gas H<sub>2</sub>. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya temperatur maka permeabilitas dari suatu gas juga akan meningkat. Pernyataan tersebut didukung oleh **Gambar IV.4** dan **4.5** yang menunjukkan hubungan antara temperature feed terhadap permeabilitas pada gas Hidrogen dan Methana.

Berdasarkan **Gambar IV.4** dan **4.5**, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan perubahan permeabilitas antara gas hydrogen dan methana. Pada gas hydrogen, terdapat perubahan yang signifikan untuk membrane polyimide maupun polyetherimide, sedangkan pada gas methana peningkatan permeabilitas terhadap peningkatan temperatur sangat kecil terutama pada membrane polyetherimide. Menurut Abadi, dkk (2014), peningkatan permeabilitas yang dipengaruhi peningkatan temperatur ini dapat terjadi karena peningkatan mobilitas ikatan polimer sebagai akibat kenaikan temperatur dari feed. Hal ini membuat energi kinetik dari molekul permease meningkatkan permeabilitas gas. Selain itu faktor lain yang dapat mengakibatkan hal yang sama dapat dijelaskan dari penelitian Ying Kong, dkk (2015) yang menyebutkan bahwa terjadi kenaikan permeabilitas gas hidrogen terhadap kenaikan temperatur feed. Dalam penelitian ini, perpindahan massa yang terjadi diilustrasikan sesuai model *solution-diffusion*, dimana peristiwa perpindahan massa sangat bergantung pada kelarutan dan difusivitas gas. Berdasarkan teori, terdapat efek yang kontradiktif terhadap kenaikan temperatur pada model ini. Kenaikan temperatur akan menurunkan kelarutan gas terhadap material membran dan sebaliknya, akan meningkatkan difusivitas gas melalui membran. Terkait dengan hasil di atas, proses perpindahan yang terjadi didominasi oleh fenomena difusi, sedangkan kelarutan gas tidak terlalu berpengaruh besar dalam hal ini.

### IV. 3. Pengaruh Tekanan Feed Terhadap Persen Recovery

Perbedaan tekanan memiliki pada fenomena perpindahan massa pada membran permeasi. Dalam hal ini, perbedaan yang dimaksud merupakan perbedaan tekanan antara sisi tube (feed dan retentat) dan sisi shell (permeat). Dalam penelitian ini, dikaji pengaruh tekanan feed terhadap kinerja membran permeasi. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan hubungan antara tekanan feed terhadap persen recovery yang ditunjukkan pada **Gambar IV.6**.



**Gambar IV. 6** Hubungan Tekanan Feed Terhadap Persen Recovery Hidrogen  
( $T_F=298$  K,  $T_S=1$  atm,  $A= 1000$  m<sup>2</sup>, fraksi H<sub>2</sub> feed= 0.7644, balance CH<sub>4</sub>)

**Gambar IV.6** menunjukkan bahwa kenaikan tekanan feed menyebabkan peningkatan persen recovery pada setiap material membran yang digunakan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa *pressure ratio* merupakan *driving force* yang menyebabkan terjadinya perpindahan massa pada membran.

Semakin tinggi *pressure ratio* yang digunakan, maka semakin tinggi persen recovery yang didapatkan.

(Baker, 2004)

Dapat dilihat pula, terdapat gradien kenaikan yang berbeda pada setiap membran yang digunakan. Gradien kenaikan tertinggi terdapat pada membran polyimide (PI), polysulfone (PSf), cellulose acetate (CA), polystyrene (PStr), dan polyetherimide (PEI) secara berturut-turut. Hal ini disebabkan karena perbedaan nilai permeabilitas gas hidrogen dan methana pada masing-masing membran yang digunakan. Nilai permeabilitas gas hidrogen dan methana pada masing-masing membran ditunjukkan oleh tabel 4.1.

**Tabel IV. 1** Permeabilitas Gas Hidrogen dan Methana pada Temperatur 298 K

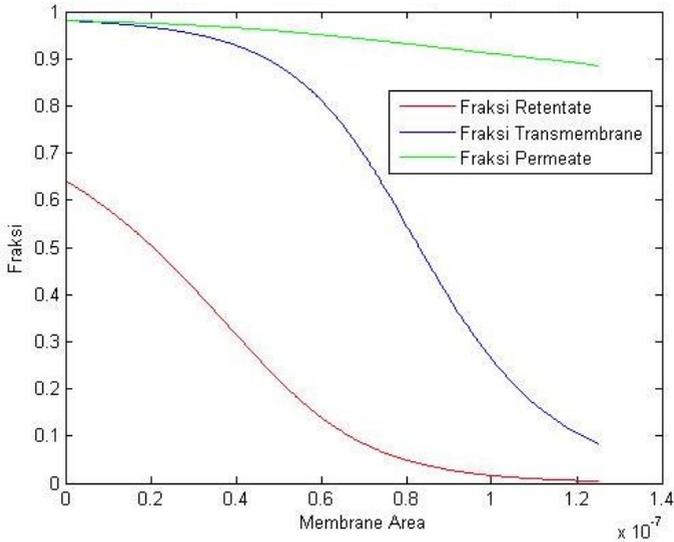
Material Membran	Permeabilitas, $\text{m}^3(\text{STP})/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$		Selektivitas	Reff
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>		
Polyetherimide (PEI)	5.83E-11	2.26E-12	25.8	Abadi (2014)
Polyimide (PI)	1.42E-09	9.93E-12	143	Zolandz (1992)
Polusulfone (PSfn)	7.50E-10	2.27E-11	33	Zolandz (1992)
Polystyrene (PStr)	1.80E-10	6.00E-12	30	Alqaheem (2017)
Cellulose Acetate (CA)	1.80E-10	2.69E-12	66.9	Alqaheem (2017)

Permeabilitas hidrogen terbesar terdapat pada material membran polyimide dan terkecil pada material membran polyetherimide. Sedangkan permeabilitas methana terbesar terdapat pada material membran polysulfone dan terkecil pada polyetherimide. Kinerja membran tidak ditunjukkan oleh selektivitas saja, melainkan permeabilitas hidrogen dan methana.

Selektivitas merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan suatu zat untuk melalui membran dibandingkan dengan zat lain, yang nilainya ditunjukkan oleh perbandingan permeabilitas antara gas hidrogen dan methana. Selektivitas yang besar tidak selalu menunjukkan kinerja yang baik pada membran, contohnya pada membran polysulfone dan cellulose acetate. Dari **Tabel IV.1** dapat dilihat bahwa selektivitas cellulose acetate lebih tinggi dibandingkan polysulfone. Namun jika ditinjau nilai permeabilitasnya, Permeabilitas hidrogen pada cellulose acetate lebih rendah dibandingkan polysulfone dan Permeabilitas methana pada cellulose acetate lebih tinggi dibandingkan polysulfone. Hasil simulasi menunjukkan bahwa persen recovery yang didapatkan pada membran polysulfone lebih besar dibandingkan pada membran cellulose acetate. Dengan demikian, gas hidrogen lebih mudah larut dan berdifusi pada membran polysulfone dibandingkan cellulose acetate, begitu juga pada gas methana. Parameter inilah yang menyebabkan kinerja membran polysulfone lebih baik daripada cellulose acetate.

#### **IV. 4. Distribusi Konsentrasi pada Membran Permeasi**

Pada sistem membran permeasi terjadi perubahan konsentrasi setiap perubahan luasan membran yang dilewati feed. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan distribusi konsentrasi setiap perubahan luasan membran yang dapat ditunjukkan pada **Gambar IV.7**



**Gambar IV. 7** Distribusi Konsentrasi pada Membran Permeasi ( $T_F = 353$  K,  $P_T = 51$  atm,  $P_S = 1$  atm,  $A = 1000$  m<sup>2</sup>, fraksi H<sub>2</sub> feed = 0.7644, balance CH<sub>4</sub>)

**Gambar IV.7** menunjukkan perubahan perubahan konsentrasi hidrogen per luas membran. Perubahan konsentrasi hidrogen pada sisi tube ditunjukkan oleh fraksi retentate, sedangkan perubahan konsentrasi hidrogen pada sisi shell ditunjukkan oleh fraksi permeate. Adapaun perubahan konsentrasi pada dinding membran ditunjukkan oleh fraksi transmembrane. Untuk fraksi gas di transmembrane memiliki perubahan yang sangat signifikan dibandingkan dengan konsentrasi di retentate maupun di permeate. Untuk aliran permeate sendiri perubahan dari fraksi gas hydrogen cenderung landai, sedangkan untuk distribusi konsentrasi dari aliran retentate semakin besar luas area membrane yang lalui maka fraksi dari retentate mendekati nol dikarenakan semakin luas area membrane maka banyaknya gas hydrogen yang melewati system membrane permease juga akan semakin bertambah.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pada penelitian ini digunakan model *solution-diffusion* pada proses pemisahan gas H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> pada membrane permeasi.
2. Model yang digunakan telah divalidasi dengan data eksperimen dari jurnal dengan tingkat akurasi rata-rata 97.51%.
3. Hasil simulasi ini, pengaruh variabel operasi terhadap kinerja *hollow fiber membran* telah dikaji secara teoritis:
  - Temperatur feed berpengaruh pada permeabilitas hidrogen dan methana sehingga secara tidak langsung berpengaruh pada kinerja membran. Kenaikan temperatur feed menyebabkan kenaikan persen recovery.
  - Kenaikan tekanan feed menyebabkan kenaikan persen recovery secara eksponensial.
  - Material membran yang memberikan pengaruh terbaik secara berurutan adalah polyimide, polysulfone, cellulose acetate, polystyrene, dan polyetherimide.

**(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)**

## DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, dkk. 2004. *Study of temperature dependent gas permeability for polycarbonate membrane*, Indian Journal of Pure & Applied Physics Vol (42): 179-181.
- Ahsan, Muhammad dan Arshad Husein. 2016. *Mathematical Modelling of membrane gas separation using the finite difference method*, A Natural Science and Engineering Vol (18): 47-52.
- Baker, Richard W. 2004. *Membrane Technology and Applications*. California: John Wiley & Sons, Ltd.
- Ermawati, Rahyati. 2011. *Konversi Limbah Plastik Sebagai Sumber Energi Alternatif*, Jurnal Riset Industri Vol (5), No. 3: 257-263.
- Geankoplis, Christie J. 2003. *Transport Processes and Unit Operations*. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc.
- Grashoff, G.J., dkk. 1983. *A Review of The Technology Emphasising The Current Status of Palladium Diffusion*, Platinum Metal Rev Vol (4), No. 27: 157-169.
- Kohl, Arthur. 1997. *Gas Purification Fifth Edition*. Texas: Gulf Publishing Company.
- Panyuan, dkk. 2015. *Recent developments in membranes for efficient hydrogen purification*, Journal of Membrane Science Vol (495): 130-168.
- Rodrigues, Diana. 2009. *Model development of a membrane gas permeation unit for separation of Hydrogen and Carbon Dioxide*. Lisbon: Instituto Superior Tecnico.
- Rousseau, Ronald. 1987. *Handbook of Separation Process Technology*. New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Schell, W.J. 1983. *Membrane Use/Technology Growing: Hydrocarbon Process*. U.S.A.
- Sinha, S. 2010. *Modelling and Simulation for Pressure Swing Adsorption System for Hydrogen Purification*. ChemicalEng.

Thomas, J.W. dan B.D. Crittenden. 1998. *Adsorption Technology and Design*. Boston: Butterworth Heinemann.  
[www.inside.mines.edu](http://www.inside.mines.edu), diakses pada tanggal 25 Januari 2017.

## DAFTAR NOTASI

$Q_f$	Flowrate feed ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_p$	Flowrate permeat ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$Q_0$	Flowrate retentat ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$x_f$	Fraksi feed
$y_p$	Fraksi permeat
$x_0$	Fraksi retentat
$y'_{av}$	Fraksi permeat rata-rata
$\theta$	Stage cut
$E_p$	Energi aktivasi permease (kJ)
$P_0$	Permeabilitas zat saat suhu 273 K (Barrer)
$T$	Suhu (K)
$R$	Konstanta tetapan gas ( $\text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol}$ )
$D_e$	energi aktivasi difusi (kJ)
$S_e$	energi aktivasi kelarutan (kJ)
$N_A$	Flux A ( $\text{kg mol} / \text{s} \cdot \text{m}^2$ )
$D_{AB}$	Difusifitas ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

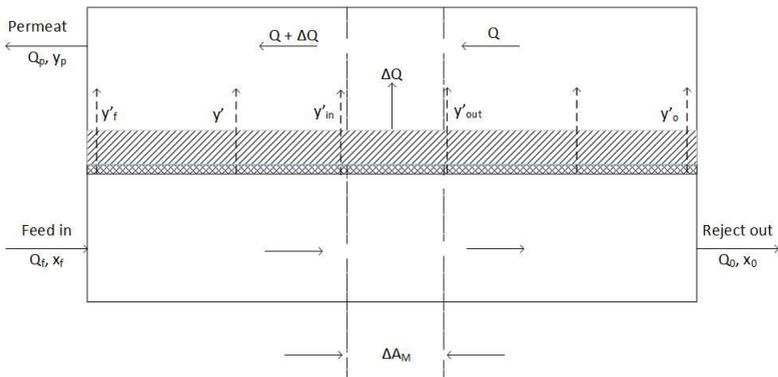
$\frac{\partial c}{\partial x}$	Gradien konsentrasi
$L$	Tebal membrane (m)
$c_{1is}$	Konsentrasi zat pada feed (kg mol/ m <sup>3</sup> )
$c_{2is}$	Konsentrasi zat pada permeat (kg mol/ m <sup>3</sup> )
$H$	Konstanta Henry (kg mol/ m <sup>3</sup> .atm)
$S$	Kelarutan (m <sup>3</sup> (STP)/atm.m <sup>3</sup> )
$p_{A1i}$	Tekanan partial pada feed (atm)
$p_{A2i}$	Tekanan partial pada permeat (atm)
$P_M$	Permeabilitas (Barrer)
$P'_A$	Permeabilitas gas A (kg mol/ s.m.atm)
$P'_B$	Permeabilitas gas B (kg mol/ s.m.atm)
$A_m$	Luas penampang membrane (m <sup>2</sup> )
$p_h$	Tekanan pada sisi Feed (atm)
$p_l$	Tekanan pada sisi permeat (atm)
$\alpha^*$	Selektivitas
$r$	Ratio tekanan

## APPENDIKS A PENYELESAIAN NUMERIK

- Model Countercurrent Flow

Asumsi:

- Nilai permeabilitas gas sama seperti nilai permeabilitas spesies murninya
- Permeabilitas yang telah ditentukan independen terhadap tekanan
- System steady state
- Ketebalan membran seragam
- Tekanan total konstan pada setiap bagian membrane
- Tidak ada gradien konsentrasi pada arah tegak lurus dari membran
- Aliran plug
- Reaksi berlangsung dengan kondisi *isothermal*



- Neraca massa total

Akumulasi = input - output + generasi - konsumsi

Asumsi sistem steady state dan tidak ada generasi dan konsumsi sehingga

Input = output

$$Q_f = Q_p + Q_o$$

Persamaan neraca komponen dapat dituliskan:

$$Q_f x_f = Q_p y_p + Q_0 x_0$$

Untuk persamaan neraca massa di setiap increment dapat dituliskan

$$\Delta Q y'_{av} = Q_{in} x_{in} - Q_{out} x_{out}$$

dimana,

$$y'_{av} = (y_{in} + y_{out})/2$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{in}(x_{in} - x_{out})}{(y'_{av} - x_{out})}$$

- Menghitung permeabilitas setiap gas pada membran

$$E_p = D_e + S_e$$

$$P' = P_0 \exp(-E_p/RT)$$

- Menghitung komposisi aliran permeat

$$\begin{aligned} N_A &= D_{AB} \frac{\partial c}{\partial x} \\ &= \frac{D_{AB}}{L} (c_{1is} - c_{2is}) \end{aligned}$$

Dimana :

$$H = \frac{S}{22,414} = \frac{c_s}{p_A} = \frac{c_{1is}}{p_{A1i}} = \frac{c_{2is}}{p_{A2i}}$$

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{D_{AB} H}{L} (p_{A1i} - p_{A2i}) \\ &= \frac{D_{AB} S}{L (22,414)} (p_{A1i} - p_{A2i}) \end{aligned}$$

$$P_M = D_{AB} S \frac{1}{22,414} \frac{m^3(STP) \cdot m}{s \cdot m^2 C \cdot S \cdot atm} = D_{AB} S \frac{kmol \cdot m}{s \cdot m^2 C \cdot S \cdot atm}$$

$$N_A = \frac{P_M}{L} (p_{A1i} - p_{A2i})$$

$$\frac{Q_A}{A_m} = \frac{Q_p y_p}{A_m} = \left( \frac{P'_A}{L} \right) (p_h x_0 - p_l y_p)$$

$$\frac{Q_B}{A_m} = \frac{Q_p(1 - y_p)}{A_m} = \left(\frac{P'_B}{L}\right) [p_h(1 - x_0) - p_l(1 - y_p)]$$

$$\left(\frac{P'_A}{L}\right) (p_h x_0 - p_l y_p) \frac{1}{y_p}$$

$$= \left(\frac{P'_B}{L}\right) [p_h(1 - x_0) - p_l(1 - y_p)] \frac{1}{(1 - y_p)}$$

$$\frac{y_p}{1 - y_p} = \frac{P'_A/P'_B (p_h x_0 - p_l y_p)}{[p_h(1 - x_0) - p_l(1 - y_p)]}$$

dimana:

$$\alpha^* = \frac{P_A}{P_B}$$

$$r = \frac{p_l}{p_h}$$

$$\frac{y_p}{1 - y_p} = \frac{\alpha^* [x_0 - r y_p]}{(1 - x_0) - r(1 - y_p)}$$

$$y_p \left( (1 - x_0) - r(1 - y_p) \right) = (1 - y_p) (\alpha^* [x_0 - r y_p])$$

$$y_p - x_0 y_p - r y_p - r y_p^2 = \alpha^* x_0 - \alpha^* x_0 y_p - \alpha^* r y_p^2 - \alpha^* r y_p$$

$$r y_p^2 - \alpha^* r y_p^2 + r y_p + x_0 y_p - \alpha^* x_0 y_p - y_p - \alpha^* r y_p^2 - \alpha^* x_0$$

$$= 0$$

$$y_p^2 - \alpha^* y_p^2 + y_p + \frac{x_0 y_p}{r} - \frac{\alpha^* x_0 y_p}{r} - \frac{y_p}{r} - \alpha^* y_p^2 - \frac{\alpha^* x_0}{r} = 0$$

Persamaan kuadratik dapat diselesaikan dengan persamaan :

$$y_p = \frac{-b + \sqrt{b^2}}{4ac}$$

Dimana :

$$a = 1 - \alpha^*$$

$$b = -1 + \alpha^* + \frac{1}{r} + \frac{x_0}{r} (\alpha^* - 1)$$

$$c = \frac{-\alpha^* x_0}{r}$$

- Menghitung Komposisi aliran retentate

$$\frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\Delta A_m} = \left(\frac{P_A}{t}\right) P_h (x - ry')_{av}$$

Dimana :

$$(x - ry')_{av} = [(x_{in} - ry'_{in}) + (x_{out} - ry'_{out})]/2$$

$$x_{out} = x_{in} - \Delta x$$

Sehingga

$$(x - ry')_{av} = [(x_{in} - ry'_{in}) + (x_{in} - \Delta x - ry'_{out})]/2$$

$$= \frac{[2x_{in} - \Delta x - ry'_{in} - ry'_{out}]}{2}$$

$$= \frac{\left[2x_{in} - \Delta x - 2r \left(\frac{y'_{in} + y'_{out}}{2}\right)\right]}{2}$$

$$= \frac{[2x_{in} - \Delta x - 2ry'_{av}]}{2}$$

$$\Delta A_m = \frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\left(\frac{P_A}{t}\right) P_h (x - ry')_{av}}$$

$$\Delta A_m = \frac{\Delta Q^p \cdot y'_{av}}{\left(\frac{P_A}{t}\right) P_h [2x_{in} - \Delta x - 2ry'_{av}]/2}$$

Dengan trial  $\Delta x$  hingga mendapatkan jumlah luas membrane setiap increment sesuai dengan luas membrane yang telah ditentukan. Nilai fraksi output terakhir dari increment yang nilai luas membrannya sesuai dengan luas membrane yang telah ditentukan merupakan fraksi retentate total dari sistem membrane permease.

- Menghitung % Recovery

$$\% \text{Recovery} = \frac{Q_p y_p}{Q_1 x_1} \times 100\%$$

- Menghitung % Error

$$\% \text{error} = \frac{\% \text{recovery eksperimen} - \% \text{recovery simulasi}}{\% \text{recovery eksperimen}}$$

## LAMPIRAN B

### LISTINGAN PROGRAM (Matlab v8.1)

```

%Program Simulasi Proses Pemisahan H2/CH4 di dalam
Membran Permeasi
disp('KONDISI OPERASI');
Linput=0.12;
xinput=0.75;
Ph=3545.99;
Pl=101.314;
T=298;
disp('DIMENSI MEMBRAN');
A=0.005;
t=1;
dx=0.0001;
p1=#permeabilitashidrogen;
p2=#permeabilitasmethana;
a=p1/p2;
R=p1/t;           %permeance hidrogen (m3(STP)/s.m2.Pa)
r=Pl/Ph;         %pressure ratio
Lin=Linput;
xin=xinput;
n=0;
while A >= Am
    n=n+1;
    k=Am; l=xin;
    %PREDIKSI PROPERTI PERMEATE
    xout=xin-dx;
    yzin=(((-1+a+(1/r)+((xin/r)*(a-1))))+(((1+a+(1/r)+((xin/r)*(a-1)))^2)-4*(1-a)*(-a*xin/r))^0.5)/(2*(1-a));
    yzout=(((-1+a+(1/r)+((xout/r)*(a-1))))+(((1+a+(1/r)+((xout/r)*(a-1)))^2)-4*(1-a)*(-a*xout/r))^0.5)/(2*(1-a));
    yzav=(yzin+yzout)/2;
    dV=Lin*(xin-xout)/(yzav-xout);

```

```

Vout=Vin+dV;
sigmaV=dVyzav+dV*yzav;
%KROSCEK Am
asoy1=xin-(r*yzin);
asoy2=xout-(r*yzout);
asoy3=(asoy1+asoy2)/2;
Am=am+((dV*yzav/3600)/(R*Ph*1000*(asoy3)));
%PENETAPAN ULANG KONSTANTA
Lout=Lin-dV;
Lin=Lout;
xin=xout;
Vin=Vout;
dVyzav=sigmaV;
am=Am;

disp([num2str(k), ' ', num2str(l), ' ', num2str(yzav), ' ',
,num2str(yout)]);
yout=sigmaV/Vout;
end
MembraneArea=Am-((dV*yzav/3600)/(R*Ph*1000*(asoy3)));
Lout=Lin;
xout=xin+dx;
Vout=Vin;
yout=(sigmaV-dV*yzav)/(Vout-dV);

recovery=((Vout*yout)/(Lininput*xinput))*100;
eff=100-(abs(((MembraneArea-A)/MembraneArea)*100));
disp(['Selektivitas = ',num2str(a)]);
disp(['Perhitungan dilakukan hingga partisi - ',num2str(n)]);
disp('PERMEATE');
disp(['Flowrate permeate = ',num2str(Vout)]);
disp(['Fraksi permeate = ',num2str(yout)]);
disp('RETENTATE');
disp(['Flowrate retentate = ',num2str(Lout)]);
disp(['Fraksi retentate = ',num2str(xout)]);

```

```
disp(['Recovery = ',num2str(recovery),' %']);
disp(['Effective Membrane Area = ',num2str(ef),' %']);
```

```
%Distribusi Konsentrasi Sepanjang Membran
```

```
Lin(1)=Lininput;
```

```
xin(1)=xininput;
```

```
for i=1:n
```

```
    %PREDIKSI PROPERTI PERMEATE
```

```
    xout(i)=xin(i)-dx;
```

```
    yzin(i)=[(-(-1+a+(1/r)+((xin(i)/r)*(a-1))))+(((1+a+(1/r)+((xin(i)/r)*(a-1)))^2)-4*(1-a)*(-a*xin(i)/r))^0.5)/(2*(1-a))];
```

```
    yzout(i)=[(-(-1+a+(1/r)+((xout(i)/r)*(a-1))))+(((1+a+(1/r)+((xout(i)/r)*(a-1)))^2)-4*(1-a)*(-a*xout(i)/r))^0.5)/(2*(1-a))];
```

```
    yzav(i)=(yzin(i)+yzout(i))/2;
```

```
    dV(i)=Lin(i)*(xin(i)-xout(i))/(yzav(i)-xout(i));
```

```
    Vout(i)=Vin(i)+dV(i);
```

```
    sigmaV(i)=dVyzav(i)+dV(i)*yzav(i);
```

```
    yout(i)=sigmaV(i)/Vout(i);
```

```
    %KROSCEK Am
```

```
    asoy1=xin(i)-(r*yzin(i));
```

```
    asoy2=xout(i)-(r*yzout(i));
```

```
    asoy3=(asoy1+asoy2)/2;
```

```
    Am(i)=am(i)+((dV(i)*yzav(i)/3600)/(R*Ph*1000*(asoy3)));
```

```
    %PENETAPAN ULANG KONSTANTA
```

```
    Lout(i)=Lin(i)-dV(i);
```

```
    Lin(i+1)=Lout(i);
```

```
    xin(i+1)=xout(i);
```

```
    Vin(i+1)=Vout(i);
```

```
    dVyzav(i+1)=sigmaV(i);
```

```
    am(i+1)=Am(i);
```

```
end
```

```
plot(Am,xout,'r',Am,yzav,'b',Am,yout,'g');
```

```
xlabel('Membrane Area'); ylabel('Fraksi'); title('Perubahan
Komposisi Permeate dan Retentate pada Single-Stage
Membrane');
legend('Fraksi Retentate','Fraksi Transmembrane','Fraksi
Permeate');
```

```
%Permeabilitas Membran
```

```
%Permeabilitas Polysulfone
```

```
p1=(100)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas hidrogen
```

```
p2=(100)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas methana
```

```
%Permeabilitas Polystyrene
```

```
p1=(24)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas hidrogen
```

```
p2=(24/30)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas methana
```

```
%Permeabilitas Cellulose Acetate
```

```
p1=(24)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas hidrogen
```

```
p2=(24/67)*(7.501*(10^(-12)));%permeabilitas methana
```

```
%Permeabilitas Polyetherimide
```

```
k11=2.05;%ln permeabilitas hidrogen pada suhu 298 K
```

```
k12=2.25;%ln permeabilitas hidrogen pada suhu 315 K
```

```
k21=-1.2;%ln permeabilitas methana pada suhu 298 K
```

```
k22=-1.05;%ln permeabilitas methana pada suhu 315 K
```

```
EaR1=(k12-k11)/((1000/298)-(1000/315));%Ea/R hidrogen
```

```
EaR2=(k22-k21)/((1000/298)-(1000/315));%Ea/R methana
```

```
lnp1=(EaR1*((1000/298)-(1000/T))+k11;%ln permeabilitas
```

```
hidrogen pada suhu T
```

```
lnp2=(EaR2*((1000/298)-(1000/T))+k21;%ln permeabilitas
```

```
methana pada suhu T
```

```
p1=7.501*(10^(-12))*exp(lnp1);%permeabilitas hidrogen pada
suhu T
```

```
p2=7.501*(10^(-12))*exp(lnp2);%permeabilitas methana pada
suhu T
```

%Permeabilitas Polyimide

k11=2.65;%ln permeabilitas hidrogen pada suhu 298 K

k12=3.17;%ln permeabilitas hidrogen pada suhu 343 K

k21=-2.31;%ln permeabilitas methana pada suhu 298 K

k22=-1.02;%ln permeabilitas methana pada suhu 343 K

EaR1=(k12-k11)/((1000/298)-(1000/343));%Ea/R hidrogen

EaR2=(k22-k21)/((1000/298)-(1000/343));%Ea/R methana

lnp1=(EaR1\*((1000/298)-(1000/T))+k11;%ln permeabilitas hidrogen pada suhu T

lnp2=(EaR2\*((1000/298)-(1000/T))+k21;%ln permeabilitas methana pada suhu T

p1=(10<sup>-10</sup>)\*exp(lnp1);%permeabilitas hidrogen pada suhu T

p2=(10<sup>-10</sup>)\*exp(lnp2);%permeabilitas methana pada suhu T

## LAMPIRAN C DATA HASIL SIMULASI

**Tabel C. 1** Pengaruh Perubahan Tekanan Terhadap Persen Recovery

Tekanan		Persen Recovery (%)				
(atm)	(kPa)	PI	PEI	PSf	PStr	CA
<b>3</b>	309.39	3.348	0.141	1.848	0.452	0.431
<b>7</b>	721.91	11.138	0.467	6.000	1.443	1.442
<b>11</b>	1134.43	18.751	0.795	10.140	2.458	2.451
<b>15</b>	1546.95	26.173	1.122	14.176	3.479	3.458
<b>19</b>	1959.47	33.382	1.448	18.218	4.479	4.462
<b>23</b>	2371.99	40.347	1.774	22.213	5.463	5.463
<b>27</b>	2784.51	47.045	2.101	26.117	6.458	6.462
<b>31</b>	3197.03	53.440	2.426	29.992	7.464	7.458
<b>35</b>	3609.55	59.501	2.752	33.791	8.453	8.453
<b>39</b>	4022.07	65.189	3.078	37.521	9.452	9.443
<b>43</b>	4434.59	70.466	3.403	41.203	10.434	10.436
<b>47</b>	4847.11	75.296	3.728	44.781	11.425	11.421
<b>51</b>	5259.63	79.647	4.052	48.309	12.400	12.400
<b>55</b>	5672.15	83.497	4.376	51.736	13.383	13.381
<b>59</b>	6084.67	86.822	4.701	55.065	14.349	14.360
<b>63</b>	6497.19	89.645	5.024	58.310	15.323	15.336
<b>67</b>	6909.71	91.970	5.348	61.456	16.302	16.304
<b>71</b>	7322.23	93.854	5.671	64.495	17.265	17.273
<b>75</b>	7734.75	95.337	6.015	67.426	18.234	18.239
<b>79</b>	8147.27	96.487	6.330	70.235	19.186	19.200
<b>83</b>	8559.79	97.359	6.644	72.920	20.143	20.162
<b>87</b>	8972.31	98.018	7.007	75.472	21.104	21.115

<b>91</b>	9384.83	98.504	7.318	77.888	22.049	22.068
<b>95</b>	9797.35	98.869	7.626	80.167	22.997	23.019
<b>99</b>	10209.87	99.135	7.933	82.307	23.948	23.966

**Tabel C. 2** Pengaruh Perubahan Temperatur Terhadap Persen Recovery

Suhu		Persen Recovery (%)	
(°C)	(K)	PI	PEI
25	298	59.5124	2.7522
30	303	62.7793	2.9249
35	308	66.0281	3.1025
40	313	69.2235	3.2844
45	318	72.3374	3.4712
50	323	75.3584	3.6622
55	328	78.2495	3.8569
60	333	80.9948	4.0558
65	338	83.5632	4.2588
70	343	85.9379	4.4653
75	348	88.106	4.6754
80	353	90.0532	4.8889
85	358	91.7698	5.1059
90	363	93.2627	5.3258
95	368	94.5359	5.549
100	373	95.6025	5.775

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Moch Saiful Azis, lahir di Surabaya, Propinsi Jawa Timur, pada tanggal 22 Januari 1995, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis yaitu dimulai di SDN Ngagel Rejo IV/399 Surabaya, SMP Negeri 2 Surabaya, dan SMA Negeri 20 Surabaya. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia angkatan 2012. Penulis memilih

Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Pemodelan dan Simulasi Proses Pemisahan H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> di dalam Membran Permeasi”**

### Data Pribadi Penulis

Nama	: Moch Saiful Azis
Tempat Tanggal lahir	: Surabaya, 22 Januari 1995
Alamat	: Barata Jaya I No.67, Gubeng, Surabaya
Telp	: 085655336352
Email	: msaifulazis@gmail.com

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



Arif Rochman Hartono dilahirkan di Sidoarjo yang terletak di Propinsi Jawa Timur, pada tanggal 5 April 1994, merupakan anak Pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal yang telah ditempuhnya yaitu dimulai di SDN Wadung Asih 2 Sidoarjo, SMPN 5 Sidoarjo, dan SMK Farmasi SEKESAL Surabaya. Pada jenjang perkuliahan penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember jurusan Teknik Kimia

angkatan 2013. Semasa kuliah penulis aktif dalam kegiatan Unit Kegiatan Mahasiswa Resimen Mahasiswa 802 ITS dan menjabat sebagai Provost. Penulis juga pernah melakukan kerja praktek di PT. Petrokimia Gresik. Penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, dan selanjutnya melakukan penelitian dengan judul **“Pemodelan dan Simulasi Proses Pemisahan H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> di dalam Membran Permeasi”**

### Data Pribadi Penulis

Nama : Arif Rochman Hartono  
Tempat Tanggal lahir : Sidoarjo, 05 April 1994  
Alamat : Banjar Kemantren RT:03 RW:04,  
Buduran, Sidoarjo  
Telp : 08977431439  
Email : arif.rochman277@gmail.com

