



**THESIS TK 142541**

**PENGARUH TEKANAN DAN ADSORBEN PADA SISTEM *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA) DALAM PEMURNIAN HIDROGEN**

**VIBIANTI DWI PRATIWI**

**2314 201 018**

**DOSEN PEMBIMBING**

**Juwari, ST., M.Eng., Ph.D.**

**Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D.**

**PROGRAM MAGISTER**

**TEKNOLOGI PROSES**

**JURUSAN TEKNIK KIMIA**

**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2016**



**THESIS TK 142541**

**THE INFLUENCE OF PRESSURE AND ADSORBENT ON A SYSTEM  
PRESSURE SWING ADSORPTION IN THE PURIFICATION OF  
HYDROGEN**

**VIBIAN TI DWI PRATIWI**

**2314 201 018**

**ADVISORS:**

**Juwari, ST., M.Eng., Ph.D.**

**Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D.**

**MAGISTER PROGRAM**

**PROCESS TECHNOLOGY**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

**FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**SURABAYA**

**2016**

## LEMBAR PENGESAHAN

### PENGARUH TEKANAN DAN ADSORBEN PADA SISTEM *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA) DALAM PEMURNIAN HIDROGEN

Laporan Thesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat mencapai gelar  
Magister Teknik (MT)  
di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)

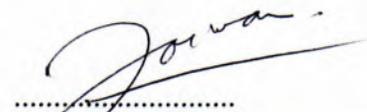
Oleh:  
Vibianti Dwi Pratiwi  
NRP. 2314 201 018

Tanggal Ujian : 13 Juli 2016  
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh:

1. Juwari, ST., M.Eng., Ph.D. (Pembimbing I)

NIP: 1973 06 15 1999 03 1003



2. Prof. Ir. Renanto Handogo, MS., Ph.D. (Pembimbing II)

NIP: 1953 07 19 1978 03 1001



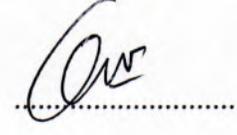
3. Prof. Dr. Ir. Gede Wibawa, M. Eng. (Penguji I)

NIP: 1963 01 22 1987 01 1001



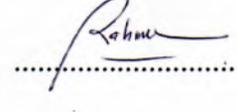
4. Setiyo Gunawan, S.T., Ph.D (Penguji II)

NIP: 1976 03 23 2002 12 1001



5. Dr. Yeni Rahmawati., S.T., M.T (Penguji III)

NIP: 1976 10 20 2005 01 2001



Direktur Program Pascasarjana



**Prof. Ir. Drauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D**

NIP. 1960 12 02 1987 01 1001

# **PENGARUH TEKANAN DAN ADSORBEN PADA SISTEM *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA) DALAM PEMURNIAN HIDROGEN**

Nama Mahasiswa : Vibianti Dwi Pratiwi

Dosen Pembimbing : 1. Juwari, S.T., M.Eng, Ph.D.

2. Prof. Ir. Renanto Handogo, M.S., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Hidrogen merupakan salah satu gas yang memiliki banyak fungsi seperti agen sintesis senyawa organik, reaktan dalam proses *hydrocracking*, hidroalkilasi, dan hidrodessulfurisasi dalam industri *petrochemical*, reaktan proses hidrogenasi lemak dalam industri *food and beverages*, agen reduktor dalam industri material, produksi metanol, pembuatan silikon dan masih banyak lagi. Oleh karena itu proses pemurnian hidrogen sangat penting. *Pressure Swing Adsorption* (PSA) merupakan cara yang paling sering digunakan dalam memurnikan hidrogen. Hasil kemurnian hidrogen dalam PSA dipengaruhi oleh jumlah bed, jenis adsorben yang digunakan serta tekanan operasinya. Pemurnian hidrogen dengan unit PSA dapat dipermudah menggunakan software Aspen Adsorption. Dalam penelitian ini disimulasikan dengan 2 dan 4 bed dengan jenis adsorben silica gel, karbon aktif, dan zeolite serta tekanan operasi yang divariasikan antara 2 hingga 34 bar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PSA dengan 2 bed untuk adsorben karbon aktif/ silica gel pada tekanan 7 bar diperoleh kemurnian hidrogen tertinggi sebesar 99,92% sedangkan kemurnian hidrogen sebesar 99,99% menggunakan adsorben karbon aktif pada 4 bed PSA dengan tekanan operasi 4 bar. Penelitian ini menggunakan data industri seperti PT Pertamina Cilacap untuk memurnikan hidrogen yang menghasilkan 87,92% pada tekanan 8 bar dengan adsorben molecular sieve pada 2 bed PSA.

**Kata Kunci : pemurnian hidrogen, adsorben, *pressure swing adsorption*, optimisasi, Aspen Adsorption**

# **THE INFLUENCE OF PRESSURE AND ADSORBENT ON A SYSTEM PRESSURE SWING ADSORPTION IN THE PURIFICATION OF HYDROGEN**

Name : Vibianti Dwi Pratiwi  
Advisor : 1. Juwari, S.T., M.Eng, Ph.D.  
2. Prof. Ir. Renanto Handogo, M.S., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Hydrogen has various functions in chemical industries, as an agent of organic compounds synthesis, a reactant in hydrocracking, hydroalkelation, and hydrodesulfurization process in petrochemical industry, a reactant in hydrogenated fat process, a reductant agent in material industry, methanol production, silicon manufacture, and many more. Therefore, hydrogen purification is very important process for the industry processes. Pressure Swing Adsorption (PSA) is commonly used hydrogen purification process. It is developed into the multi-bed process with combination of different adsorbent in every column at a step pressure equalization. Purification of hydrogen by PSA can be simulated using Aspen Adsorption software. This study simulated 2 and 4 beds PSA process with various type of adsorbent, those are silica gel, activated carbon, and zeolite with variation of pressure from 2 to 34 bar. Simulation results showed that 2 beds PSA using combination of activated carbon and silica gel at 7 bar gave the highest purity of 99.92% hydrogen, while 4 beds PSA using activated carbon as an adsorbent gave highest purity of 99.99% hydrogen at 4 bar. This study used industry data such as hydrogen purification process from PT Pertamina Cilacap and the result gave purity of 87.92% hydrogen at 8 bar using molecular sieve adsorbent in 2 beds PSA.

**Keyword : hydrogen purification, adsorbent, pressure swing adsorption, optimization, Aspen Adsorption**

## KATA PENGANTAR

Segala puji, syukur, hormat, kepada Tuhan YME karena atas berkat Rahmat dan karunia-Nya untuk saya dalam menulis dan menyelesaikan laporan thesis yang berjudul “**Pengaruh Tekanan Dan Adsorben Pada Sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) Dalam Pemurnian Hidrogen**”. Dalam penyusunan thesis ini, penulis banyak mendapat bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung dari beberapa pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Juwari Purwo Sutikno, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS dan Dosen Pembimbing I atas bimbingan dan arahan yang sudah diberikan.
2. Bapak Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.Eng., selaku Koordinator Program Studi Pascasarjana Teknik Kimia FTI – ITS,
3. Bapak Prof. Ir. Renanto Handogo, M.S., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II dan Kepala Laboratorium Perancangan dan Pengendalian Proses atas bimbingan dan arahan yang sudah diberikan.
4. Bapak Setiyo Gunawan, S.T, Ph.D, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
5. Bapak dan Ibu Dosen pengajar dan seluruh karyawan Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS.
6. Lembaga Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi (DITJEN DIKTI) atas segala bantuan dana selama menjalani perkuliahan.
7. Orang tua, seluruh keluarga dan sahabat –sahabat yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang kepada saya.
8. Teman-teman Laboratorium Perancangan dan Pengendalian Proses (Perdalpro): Ane, Pras, Muniha, Arine, Mbak Dian, Cibon, Daril, Xavier, Mas Soni, Mas Misfa, Suradit, Mas Franco, Pak Agus, Bu Shinta, Fritz, Mara, Hasan, Ilham, Anggun, Hana, Firda, Nana, Nia, Gugum, Indra, Marsha, Bondi, Syaumi, Deva, Arisyi, Cakra, Novan, Alif, Firqi, Amal, Icha, Imam, Wega, Makmun, Lala, Dion, Garry, Desy, Indri, VDP, Opal, Rizki, Hermansyah.

9. Teman-teman Kelompok Belajar: Inchom, Anjana, Lower, Suradit, Mas Mis, dan Diki.

Akhir kata semoga laporan thesis ini dapat bermanfaat untuk sekarang dan masa mendatang. Penulis menyadari dalam penulisan laporan thesis ini banyak terdapat kekurangan, sehingga saran dan kritik yang membangun dari pembaca sangat diperlukan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	viii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	4
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Batasan Masalah .....	5
<b>BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b>	
2.1 Penggunaan Hidrogen .....	6
2.2 Proses Pemisahan dan Pemurnian Hidrogen .....	10
2.3 Teknik Pemisahan Adsorpsi .....	13
2.4 <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA) .....	20
2.5 Pemurnian Hidrogen dengan <i>Pressure Swing Adsorption</i> .....	23
2.6 Pemilihan <i>Fluid Package</i> .....	26
<b>BAB 3 METODELOGI PENELITIAN</b>	
3.1 Tahap Penelitian .....	30
3.2 Studi Literatur dan Lapangan .....	32
3.3 Proses Identifikasi Masalah .....	32
3.4 Simulasi menggunakan data Yang & Lee (1997) dengan Aspen Adsorption .....	32
3.5 Validasi Simulasi Proses .....	34

3.6	Pengaruh <i>Manipulated Variable</i> PSA ( <i>Pressure Swing Adsorption</i> ) .....	34
3.7	Pengaruh <i>Manipulated Variable</i> Sistem PSA ( <i>Pressure Swing Adsorption</i> ) .....	35
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1	Validasi Simulasi Proses .....	36
4.2	Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan Aspen Adsorption .....	38
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN</b>	
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
	<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Teknik Pemisahan dengan Membran .....	11
Gambar 2.2 Teknik Pemisahan Adsorpsi.....	12
Gambar 2.3 Teknik Pemisahan Distilasi.....	13
Gambar 2.4 Konsep Proses PSA.....	20
Gambar 2.5 Langkah Siklus Proses <i>Pressure Swing Adsorption</i> .....	21
Gambar 2.6 Efek Variasi Tekanan pada Kemurnian Hidrogen .....	25
Gambar 2.7 Diagram Alir Acuan Pemilihan Model Termodinamika.....	29
Gambar 3.1 Diagram Metodologi Penelitian .....	31
Gambar 3.2 Diagram Alir Acuan Pemilihan Model Termodinamika.....	30
Gambar 3.3 Kondisi Operasi Sistem PSA pada Aspen Properties.....	31
Gambar 3.4 Komponen Feed Sistem PSA pada Aspen Properties .....	31
Gambar 4.1 Validasi Simulasi Proses Pemurnian Hidrogen.....	37
Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Proses Pemurnian Hidrogen .....	38
Gambar 4.3 Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen Tanpa Variasi Adsorben....	40
Gambar 4.4 Grafik Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan Variasi Adsorben .....	42
Gambar 4.5 Bagan <i>Pressure Swing Adsorption</i> dengan 4 Bed.....	42
Gambar 4.6 Spesifikasi Umpan pada Aspen Adsorption.....	43
Gambar 4.7 Spesifikasi Adsorben pada Aspen Adsorption .....	44
Gambar 4.8 Variabel pada Step 1 .....	45
Gambar 4.9 Variabel pada Step 2 .....	45
Gambar 4.10 Variabel pada Step 3 .....	46
Gambar 4.11 Variabel pada Step 4 .....	47
Gambar 4.12 Variabel pada Step 5 .....	47
Gambar 4.13 Variabel pada Step 6 .....	48
Gambar 4.14 Hasil Simulasi PSA pada Aspen Adsorption .....	49

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penggunaan Gas Hidrogen .....	7
Tabel 2.2 Perbandingan Berbagai Macam Proses Pembentukan Hidrogen .....	9
Tabel 2.3 Perbandingan Metode Membran, PSA, dan <i>Cryogenic</i> .....	10
Tabel 2.4 Kemampuan Adsorpsi <i>Molecular Sieve</i> .....	16
Tabel 2.5 Penggunaan Adsorben pada Pemisahan Gas .....	19
Tabel 2.6 <i>Cycle Sequence</i> pada PSA 2 bed .....	26
Tabel 2.7 Pemilihan Model Termodinamika dalam Proses Industri .....	26
Tabel 2.8 Property Method Terhadap Aplikasi Selain Migas dan Petrokimia.	28
Tabel 3.1 Data Komposisi Feed .....	33
Tabel 3.2 Karakteristik Bed Adsorpsi dan Adsorben .....	34
Tabel 3.3 Spesifikasi Neraca Massa Unit PSA.....	35
Tabel 4.1 Kemurnian Hidrogen berdasarkan Tekanan dan Adsorben.....	39
Tabel 4.2 Kemurnian Hidrogen berdasarkan Tekanan dan Kombinasi Adsorben.....	41
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan <i>Existing Condition</i> .....	49

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Hidrogen merupakan unsur yang melimpah di bumi namun dalam bentuk senyawa gas H<sub>2</sub> sangat jarang tersedia di alam. Pemanfaatan hidrogen terbesar yaitu untuk produksi amonia sebagai bahan baku pupuk urea. Selain itu juga digunakan mereduksi logam pada industri baja. Dewasa ini pemanfaatan hidrogen sudah dikembangkan sebagai sumber energi baik untuk bahan bakar kendaraan, pembangkit listrik, maupun bahan bakar roket. Hidrogen sebagai bahan bakar memiliki keunggulan dibandingkan bahan bakar konvensional lain yaitu energi yang dihasilkan tinggi dan tidak menghasilkan polusi (Widhiastuti & Biansha, 2014).

Krisis energi yang melanda Indonesia dikarenakan karena jumlah penduduk yang semakin meningkat berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar. Energi yang berasal dari fosil termasuk energi yang tidak dapat diperbaharui sehingga semakin menipis (Siregar, 2010). Di sisi lain, isu lingkungan global yang menuntut tingkat kualitas lingkungan yang lebih baik, mendorong berbagai pakar energi untuk mengembangkan energi yang lebih ramah lingkungan dan mendukung keamanan pasokan berkesinambungan.

Para pakar energi di negara-negara maju seperti Amerika, Jepang dan Eropa sepakat bahwa hidrogen sangat dimungkinkan menjadi alternatif bahan bakar masa depan. Di antara sekian banyak peningkatan kebutuhan energi di Indonesia, salah satu yang cukup menarik untuk ditinjau adalah kebutuhan hidrogen. Perkembangan sektor perindustrian di Indonesia berakibat pada semakin meningkat pula kebutuhan energi, dan salah satunya adalah hidrogen. Namun pada kenyataannya, produksi hidrogen di Indonesia sekarang ini masih belum mampu menutupi kebutuhan pasar industri. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Indonesia (2014), komoditi impor hidrogen di Indonesia yang telah tercantum pada Lampiran 3 mengalami kenaikan setiap tahunnya. Pada tahun 2008 terjadi kenaikan 2.724 ton dari tahun 2007 sedangkan kebutuhan hidrogen meningkat pada 2010 dengan

selisih 3530 ton dari tahun 2009. Pada tahun 2013 tercatat impor hidrogen mencapai 39.921 ton.

Hidrogen merupakan salah satu gas yang memiliki banyak fungsi di dunia industri seperti agen sintesis senyawa organik, bahan bakar kendaraan (*fuel cell*), pemasok energi utama untuk pembangkitan listrik dengan sel bahan bakar agar mengurangi emisi gas rumah kaca dengan pengurangan penggunaan bahan bakar fosil, katalis dalam proses *hydrocracking*, hidroalkelasi, dan hidrodessulfurisasi dalam industri *petrochemical*, katalis proses hidrogenasi lemak dalam industri *food and beverages*, agen reduktor dalam industri material, produksi metanol, produksi asam hidroklorida, pembuatan silikon dan masih banyak lagi (Adhinata & Fauziyah, 2015).

Berbagai macam proses yang dapat digunakan untuk produksi hidrogen dari setiap bahan baku. Proses pembentukan hidrogen dengan bahan baku senyawa hidrokarbon diawali dengan pembentukan *syngas* (hidrogen dan karbon monoksida) dengan proses *reforming*. Untuk meningkatkan perolehan gas hidrogen, karbon monoksida kemudian direaksikan dengan *steam* menggunakan reaktor *shift converter* atau *water gas shift* menghasilkan karbon dioksida untuk meningkatkan kemurnian hidrogen. Berdasarkan *Development of Energy* tahun 2013 yang telah tercantum pada Lampiran 4 proses yang menghasilkan hidrogen terbesar adalah *steam reforming*, *Autothermal Reforming* dan *Catalytic Partial Oxidation* yang menggunakan gas alam atau gas metane batubara (CBM) sehingga menghasilkan *cost* hidrogen 6,26 (\$/GJ) (Widhiastuti & Biansha, 2014).

Beberapa proses industri membutuhkan hidrogen dengan kemurnian lebih dari 99%. Namun, pada industri besi dan baja membutuhkan kemurnian hidrogen sekitar 90% hingga 99% agar dapat digunakan untuk berbagai proses selanjutnya. Pada umumnya, industri proses memperhatikan kemurnian dan *recovery* yang saling berhubungan. Hidrogen murni diperlukan dalam aplikasi bahan bakar sel (*fuel cell*) dengan mengurangi CO hingga kurang dari 10 ppm. PSA (*Pressure Swing Adsorption*) umumnya digunakan pada pemurnian hidrogen pada gas yang keluar dari proses SMR. PSA merupakan cara paling sering digunakan dalam memurnikan hidrogen sehingga dikembangkan menjadi proses multi-bed dengan

kombinasi adsorben yang berbeda tiap kolom pada langkah *pressure equalization* (Lopes dkk, 2011).

Sistem PSA merupakan proses adsorpsi yang dapat digunakan memurnikan hidrogen dari efluen gas suatu industri. Proses siklus PSA cukup cepat yang dapat menghasilkan hidrogen secara kontinyu tanpa terganggu proses regenerasi adsorben. Sistem PSA merupakan proses yang memberikan kemurnian produk hidrogen pada tekanan yang sama saat *feed* masuk hingga menjadi produk keluar. Pada siklus PSA, adsorben untuk adsorpsi dan diregenerasi beberapa kali sebelum adsorben kehilangan kapasitas adsorpsinya. Sistem PSA seharusnya memiliki desain dengan *pressure drop* yang kecil dan memiliki awal proses pemurnian secara langsung untuk memastikan penyediaan hidrogen murni secara kontinyu (Majlan dkk, 2009).

Pemurnian hidrogen menggunakan proses PSA dengan utilitas yang berbeda akan mengubah kapasitas adsorben pada tekanan yang berbeda untuk memisahkan campuran gas menjadi komponen yang diinginkan. Hal tersebut dikarenakan setiap komponen pada campuran gas memiliki tekanan dan adsorben yang berbeda dalam pemisahan dari campuran gas. Kapasitas pengisian suatu adsorben terhadap sejumlah gas dapat dihubungkan dengan unit massa dari materi adsorben. Adsorben pada tingkatan tertentu dapat ditingkatkan pengisisannya pada tekanan parsial dari komponen gas. Pada umumnya adsorben yang tersedia dalam bentuk granula, bed, atau *extrudate*. Seluruh bentuk adsorben memiliki struktur berpori dengan begitu permukaan area yang besar (Biswas dkk, 2010).

Campuran gas yang masuk ke dalam adsorben pada tekanan tinggi kemudian komponen-komponen bergerak karena gaya adsorpsi dari permukaan adsorben dan terikat pada adsorben. Komponen gas yang terjerap pada permukaan adsorben ketika komponen yang ringan seperti hidrogen yang tidak terikat secara kuat pada adsorben, dan melalui adsorben tanpa interaksi yang signifikan. Sistem adsorpsi yang dinamik saat komponen terjerap bergerak perlahan melalui adsorben, sehingga konsentrasi gas pengotor dapat dikurangi ketika gas yang diproses tersebut melalui adsorben (Biswas dkk, 2010). Berdasarkan penelitian Nikolic (2007), proses dinamik dalam pengoperasian PSA terdapat pada siklus manner dengan *bed undergoing* yang sama pada tiap tahap operasi.

Beberapa cara pemisahan yang optimum dengan kualitas produksi baik kemurnian maupun *recovery* membutuhkan proses yang rumit sehingga didapat beberapa literatur yang menggunakan konfigurasi *multibed* PSA, *multilayered* adsorben, atau pengembangan sistem hybrid seperti PSA hybrid dan unit membran. Desain yang khusus terdapat pada proses PSA *multibed* untuk produksi hidrogen dan karbon dioksida secara simultan dari SMROG (Nikolic, 2007). Pemurnian hidrogen pada penelitian ini menggunakan data efluen *platformer fuel oil complex* dengan mengubah jumlah bed, jenis adsorben yang digunakan serta tekanan operasi dari adsorber PSA.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan yang diambil dalam penelitian ini adalah bagaimana cara membuat model optimisasi untuk pemurnian hidrogen menggunakan *Pressure Swing Adsorption* (PSA) yang disimulasikan dengan software Aspen Adsorption dengan memperhatikan aspek kondisi operasi peralatan dan adsorben yang digunakan oleh PSA dalam penghematan energi dari utilitas luar yang sangat berhubungan erat dengan waktu dan biaya dalam menghasilkan produk.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menentukan pengaruh tekanan yang paling optimal, jenis adsorben yang paling baik dalam mengadsorpsi *impurities* dan jumlah bed dalam menghasilkan kemurnian hidrogen tertinggi menggunakan *Pressure Swing Adsorption* (PSA)
2. Mensimulasikan sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dari data PT Pertamina Cilacap dalam memurnikan hidrogen

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Adsorben yang didapat dari penelitian mampu menjadi acuan dalam proses pemurnian hidrogen baik dalam skala penelitian di laboratorium maupun skala proses industri.
2. Tekanan optimum yang digunakan dalam mengoperasikan sistem PSA dapat menghasilkan biaya operasi yang minimum sehingga mampu menjadi acuan dalam skala industri pemurnian hidrogen.
3. Desain *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dengan simulasi menggunakan software Aspen Adsorption dapat menjadi literature dalam penelitian maupun beberapa industri *gas separation*

#### **1.5 Batasan Masalah**

Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut;

1. Optimisasi proses pemurnian hidrogen berdasarkan konfigurasi tekanan yang digunakan pada sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA).
2. Pengaruh perubahan jenis adsorben pada sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dalam memurnikan hidrogen
3. Simulasi rancangan *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dalam menghasilkan kemurnian Aspen Adsorption dengan memperhatikan utilitas dan biaya dalam menghasilkan produk.

## **BAB 2**

### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Penggunaan Hidrogen**

Salah satu sumber energi alternatif masa depan yang sangat potensial adalah hidrogen. Hidrogen merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polutan atau gas rumah kaca seperti NO<sub>x</sub>, CO dan CO<sub>2</sub> ketika dibakar (Iriando, et al., 2009). Kebutuhan hidrogen di berbagai jenis industri terus mengalami peningkatan, terutama dengan berkembangnya industri fuel cell yang membutuhkan H<sub>2</sub> sebagai bahan bakar (Adhikari S dkk, 2007). Berbagai upaya untuk memproduksi hidrogen telah banyak dilakukan, namun hingga saat ini sekitar 95% H<sub>2</sub> masih diproduksi dari bahan bakar berbasis fosil melalui proses pirolisis atau steam reforming dan hanya sekitar 5% yang diproduksi melalui sumber terbarukan. Hidrogen memiliki berbagai macam kegunaan yang dapat diaplikasikan sebagai teknologi dalam berbagai macam industri. Berikut penggunaan hidrogen dalam perindustrian;

##### *2.1.1 Hydrogen Fuel Cells*

Kinerja *hydrogen fuel cells* serupa dengan aki (accu), hanya saja reaksi kimia penghasil tenaga listrik ini menggunakan hidrogen dan oksigen yang bereaksi dan mengalir seperti aliran bahan bakar melalui sebuah motor bakar. Namun tidak ada pembakaran dalam proses pembangkit listrik ini. Dengan demikian, limbah dari proses ini hanyalah air murni yang aman untuk dibuang. Teknologi *hydrogen fuel cells* ini sudah banyak diaplikasikan antara lain sebagai bahan bakar bus di Los Angeles, Chicago, Vancouver, dan Jerman, serta sebagai pembangkit tenaga di perumahan, perkantoran, maupun kendaraan militer (Neni Muliawati, 2008).

##### *2.1.2 Hydrocracking in Petroleum Industry*

Proses *hydrocracking* bertujuan untuk mengkonversi minyak fraksi berat menjadi minyak berkualitas tinggi, produk bahan bakar dengan fraksi lebih ringan, seperti *gasoline*, *naphtha*, *jet*, atau *kerosene*, *diesel*, dan *hydorwax* (produk bawah yang tidak terkonversi) yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri *petrochemical* atau pelumas. Proses *hydrocracking* memiliki

dua tahapan utama. Tahap pertama adalah penjenuhan senyawa poliaromatik dan konversi nitrogen organik dan sulfur menjadi amoniak dan hidrogen sulfida. Nitrogen organik yang terdapat dalam bahan baku akan menghambat aktivitas katalis dalam proses *cracking*. Tahap kedua adalah pemotongan atau pemutusan hidrokarbon rantai panjang di atas *acidic-metal* yang mengandung katalis *hydrocracking* (Criterion Catalyst, 2005).

### 2.1.3 Hidrogenasi Lemak

Asam lemak tak jenuh dapat dikonversi menjadi asam lemak jenuh dengan reaksi hidrogenasi sederhana. Reaksi ini dilakukan dengan penambahan hidrogen pada alkena (senyawa tidak jenuh) sehingga menghasilkan alkana (senyawa jenuh). Selain pemanfaatan tersebut, dalam kimia organik hidrogen sering dipakai untuk reaksi hidrogenasi senyawa alkena, alkuna untuk sintesis senyawa organik.

Penggunaan gas hidrogen dapat dilihat pada Tabel 2.1 yang tercantum beserta kebutuhan hidrogen per satuan produk.

**Tabel 2.1 Penggunaan Gas Hidrogen Industri**

<b>Penggunaan</b>	<b>Kebutuhan H<sub>2</sub> per satuan produk</b>
Sistesis Amonia	1.950-2.230/ton NH <sub>3</sub>
Sintesis Metanol	2,25/kg metanol
Petroleum refining	109/m <sup>3</sup> crude oil
Hydrotreating:	
- Nafta	12/m <sup>3</sup>
- Coking destillates	180/m <sup>3</sup>
Hydrocracking	475-595/m <sup>3</sup>
Konversi Batubara menjadi:	
- Bahan Bakar Cair	1.070-1.250/m <sup>3</sup>
- Bahan Bakar Gas	s.d 1.560/(10 <sup>3</sup> SCM syngas)
Konversi Oil Shale menjadi:	
- Bahan Bakar Cair	230/m <sup>3</sup> oil sintetik
- Bahan Bakar Gas	1.200/(10 <sup>3</sup> SCM syngas)

(Departemen Perindustrian RI 2010)

Pada bidang fisika dan teknik, hidrogen dipakai sebagai *shelding gas* untuk pengelasan. Hidrogen juga dipakai sebagai zat pendingin rotor dalam generator listrik di stasiun penghasil listrik. Karena memiliki konduktivitas termal tinggi, hidrogen cair dapat dipakai dalam studi-studi *cryogenic* meliputi penelitian superkonduktor. Karena massanya yang sangat ringan, hidrogen banyak dipakai sebagai gas pengangkat dalam balon dan pesawat udara kecil untuk tujuan penelitian.

Hidrogen atau H<sub>2</sub> mempunyai kandungan energi per satuan berat tertinggi, dibandingkan dengan bahan bakar manapun. Kelarutan dan karakteristik hidrogen dengan berbagai macam logam merupakan subjek yang sangat penting dalam bidang metalurgi dan dalam riset pengembangan cara yang aman untuk menyimpan hidrogen yaitu digunakan sebagai bahan bakar. Kelarutan hidrogen dalam logam disebabkan oleh distorsi setempat ataupun ketidakmurnian dalam ke kisi hablur logam. Hidrogen bereaksi secara langsung dengan unsur – unsur oksidator lainnya

Penggunaan hidrogen sebagai energi alternatif memiliki banyak keunggulan. Ketika terbakar, hidrogen melepaskan energi berupa panas dan menghasilkan air sebagai bahan buangan ( $2 \text{ H}_2 + \text{ O}_2 \longrightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$ ), sama sekali tidak mengeluarkan karbon. Penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar sangat membantu mengurangi polusi CO<sub>2</sub> dan juga CO sehingga sekaligus mengurangi efek rumah kaca (meskipun pembakaran hidrogen juga menghasilkan polutan berupa NO<sub>2</sub> dalam jumlah kecil). Keunggulan lain dari Hidrogen adalah jumlahnya di alam ini sangat melimpah, 93 % dari seluruh atom yang ada di jagat raya ini adalah Hidrogen, unsur yang paling sederhana dari semua unsur yang ada di alam ini . Tiga perempat dari massa jagat raya ini adalah Hidrogen. Di bumi sendiri bentuk hidrogen yang paling umum kita kenal adalah air (H<sub>2</sub>O).

Hanya, meskipun memiliki banyak keunggulan dibanding bahan bakar lain, hidrogen juga memiliki kelemahan. Kelemahan Hidrogen (H<sub>2</sub>) ini sebagai bahan bakar adalah sifatnya sebagai sumber energi yang tidak bersifat langsung (primer) sebagaimana halnya gas alam, minyak atau batubara. Hidrogen adalah energi turunan (sekunder) sebagaimana halnya listrik yang tidak bisa didapat langsung dari alam, melainkan harus diproduksi dengan menggunakan sumber energi lain seperti gas alam, minyak, batu bara, nuklir, energi matahari dan berbagai sumber energi lainnya (Wahyu dkk, 2013).

Dalam memproduksi hidrogen terdapat dua tahapan utama dimana pada tiap tahapan tersebut terdiri dari beberapa macam proses. Proses pertama adalah pembuatan hidrogen yang meliputi *thermal decomposition*, elektrolisis air, *steam reforming*, dan gasifikasi. Perbandingan dari keempat proses tersebut ditampilkan pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Perbandingan Berbagai Macam Proses Pembentukan Hidrogen**

	<b>Steam Reforming</b>	<b>Coal Gasification</b>	<b>Electrolysis</b>	<b>Thermal Decomposition</b>
<b>Overall thermall efficiency, %</b>	70	60-65	32 (SPE) 21-25 (KOH)	Upper limit 55
<b>State of the art</b>	Well-known technology	Mature technology	Reliable technology	Research stages
<b>Environmental Effect</b>	Depletion of natural gas and other light hydrocarbons	air pollution likely to be less than via electricity from coal	Pollution problems with electricity generation	Possible release of harmful chemicals.
<b>Advantages</b>	Currently the cheapest method in the U.S.	Most secure near-term alternative to methane reforming	Small plant size; can use non-fossil fuel	Can use non-fossil fuel
<b>Disadvantages</b>	Scant long-term potential due to limitations on methane supply.	requires large plant size	High cost, low net energy efficiency	Materials problems in reactant containment; large complex plant

(George T Austin, 1984)

Tahapan utama kedua dari proses produksi hidrogen adalah tahap pemurnian hidrogen. Prinsip yang digunakan dalam pemurnian hidrogen adalah pemisahan zat-zat yang diinginkan dengan yang tidak diinginkan. Berdasarkan studi literatur Barbara Elvers (2003), metode yang biasa digunakan adalah pemisahan dengan membran, *pressure swing adsorption*, dan pemisahan secara *cryogenic*. Perbandingan dari keempat proses tersebut ditampilkan pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3 Perbandingan Metode Membran, PSA, dan Cryogenic**

	<b>Membrane</b>	<b>PSA</b>	<b>Cryogenic</b>
<b>Capital Cost</b>	low	low	High
<b>Electricity</b>	High	Low	Low
<b>Area Consumption</b>	Small	Wide	Wide
<b>Application</b>	Small capacities	Medium size unit	Large capacities
<b>Installation</b>	Easy and fast	Easy and fast	Long time
<b>Utility and Maintenance Cost</b>	Low	Moderate	High
<b>Gas Pre-treatment</b>	Needed	No	needed

(Arezoo Sadat Emrani, 2011)

Tiap-tiap metode memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing. Tetapi secara umum parameter yang dapat dipertimbangkan dalam memilih metode pembuatan hidrogen adalah biaya, emisi yang dihasilkan, kelayakan secara ekonomi, skala produksi dan bahan baku. Dalam skala laboratorium ada beberapa cara yang dapat dilakukan untuk membuat gas hidrogen diantaranya dengan menggunakan metode elektrolisis air yaitu pemanfaatan arus listrik untuk menguraikan air menjadi unsur-unsur pembentuknya, yaitu hidrogen dan oksigen.

Gas hidrogen muncul di kutub negatif atau katoda dan oksigen berkumpul di kutub positif atau anoda. Hidrogen yang dihasilkan dari proses electrolisa air berpotensi menghasilkan zero emission, apabila listrik yang digunakan dihasilkan

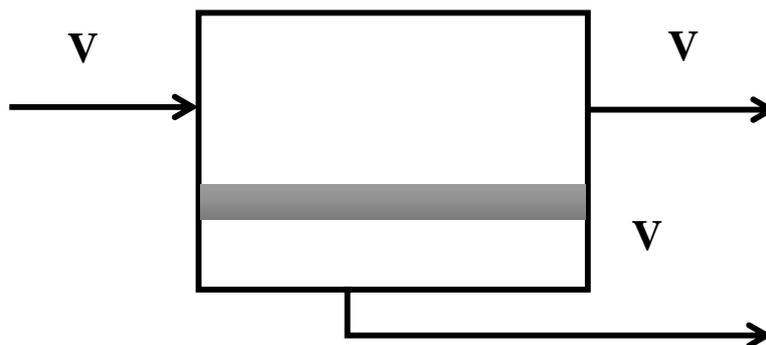
dari generator listrik bebas polusi seperti energi angin atau panas matahari. Namun demikian dari sisi konsumsi energi, cara ini memerlukan energi listrik yang cukup besar.

## 2.2 Proses Pemisahan dan Pemurnian Hidrogen

Banyak teknik pemisahan untuk memurnikan hidrogen. Menurut Grashoff (1983), pemurnian menggunakan metode pemisahan *cryogenic* dan difusi membran polimer menghasilkan hidrogen dengan kemurnian dibawah 98%. Untuk mencapai kemurnian hingga di atas 99% dapat menggunakan metode *Pressure Swing Adsorption* atau *Catalytic Purification*. Namun hanya dengan metode difusi membran paladium dapat mencapai kemurnian 99,9999%. Perbandingan teknik pemurnian hidrogen seperti pada Lampiran 1.

Pada proses pemisahan dan pemurnian hidrogen terdapat beberapa metode seperti yang telah tercantum pada Tabel 2.3 yaitu;

### 2.2.1 Pemisahan dengan membran



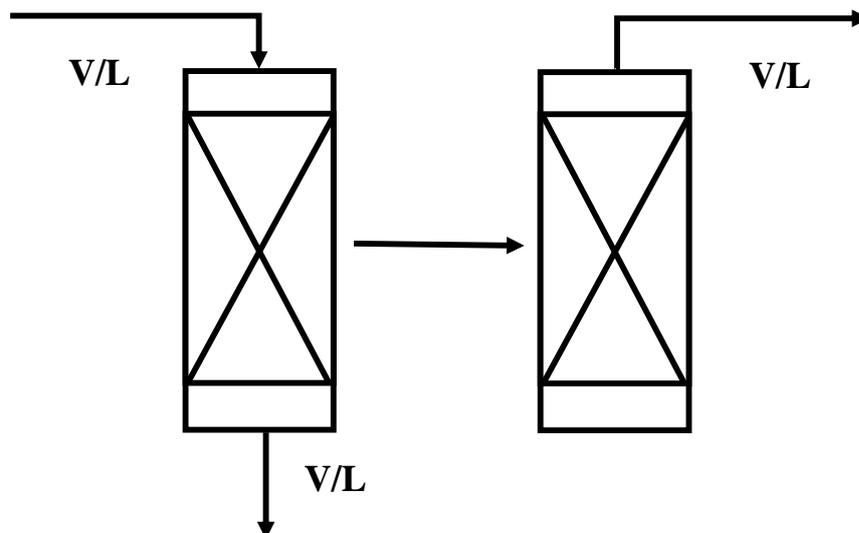
**Gambar 2.1 Teknik Pemisahan dengan Membran**

Proses pemisahan menggunakan membran berdasarkan pada kelarutan gas dan difusitas gas melewati membran seperti pada Gambar 2.1. Setiap gas memiliki laju difusi yang beragam. Besarnya penyerapan gas dinyatakan dengan koefisien permeabilitas membran. Aliran campuran gas melewati permukaan bagian atas membran berdasarkan kelarutannya terhadap membran. Gas kemudian berdifusi melewati membran. Material membran yang dipilih harus memiliki permeabilitas dan selektifitas yang tinggi terhadap komponen yang diinginkan. Kelemahan dari

metode ini adalah ketidakmampuan material tunggal membran untuk pemisahan multi gas. Sehingga biaya yang dibutuhkan untuk metode ini sangat mahal.

### 2.2.2 Pemisahan Adsorpsi

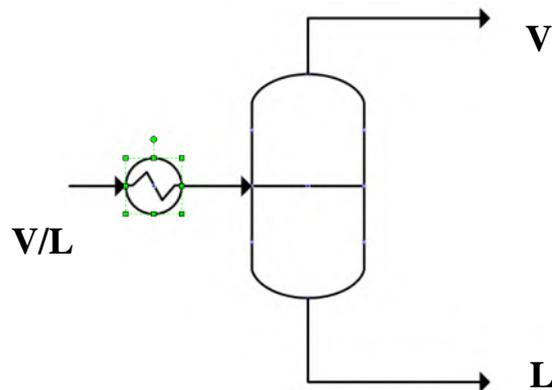
Prinsip metode ini adalah gas ditekan memasuki molekular sieve yang berfungsi sebagai adsorbent. Pada kondisi tekanan tinggi, gas cenderung untuk tertarik ke permukaan padat (teradsorp). Makin tinggi tekanan, maka makin banyak gas yang teradsorp. Material molekular sieve yang biasa digunakan adalah tipe 13X. Pemisahan adsorpsi cenderung diaplikasikan pada sistem PSA dengan bagan seperti pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Teknik Pemisahan Adsorpsi**

*Pressure Swing Adsorption* merupakan proses ekonomis untuk pemurnian hidrogen, pemisahan udara dan pengering udara skala kecil sampai besar. Parameter yang dikendalikan pada sistem ini relatif lebih sedikit sehingga proses ini lebih praktis dan sering digunakan di industri.

### 2.2.3 Distilasi Udara (*Cryogenic*)



**Gambar 2.3 Teknik Pemisahan Distilasi** (Seader, 2011)

Pengertian *cryogenic* adalah proses pemisahan gas pada suhu sangat rendah ( $-180^{\circ}\text{C}$ ) dengan cara pencairan gas berdasar perbedaan titik didih komponen penyusunnya. Distilasi *cryogenic* yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 membutuhkan *main heat exchanger* yang berfungsi sebagai menurunkan suhu sampai ke temperature kriogenik. Kriteria gas yang hendak dipisahkan yaitu kering (tidak mengandung air), tidak mengandung pengotor seperti hidrokarbon dan bebas dari debu dan partikulat. Metode ini melibatkan pemurnian gas, pendingin dan pencairan dengan proses *throtling* atau ekspander dan distilasi dengan cara *cryogenic*.

### 2.3 Teknik Pemisahan Adsorpsi

Seluruh pemisahan dengan proses adsorpsi terdiri dari dua langkah yaitu penjerapan dimana selama komponen khusus yang teradsorpsi dari feed dan regenerasi atau desorpsi dimana komponen yang teradsorpsi dihilangkan dari adsorben (Lin Lin, 1997). Pada proses adsorpsi satu atau lebih komponen gas atau liquid dijerap pada permukaan dari padatan adsorpsi hingga pemisahan tercapai (Geankoplis, 2003). Pemisahan tergantung pada kesetimbangan yang terbentuk pada bidang antar muka di antara butiran-butiran fase diam dan fase cair yang bergerak serta pada kelarutan relatif zat terlarut pada fase Bergeraknya.

Kompetisi antara molekul-molekul zat terlarut dan pelarut untuk teradsorpsi menimbulkan suatu proses dinamik di mana molekul-molekul zat terlarut dan molekul-molekul pelarut secara kontinyu mengadakan kontak dengan permukaan adsorben, tertahan beberapa saat di permukaan dan kemudian masuk kembali pada fase bergerak. Pada saat teradsorpsi, zat terlarut dipaksa untuk berpindah oleh aliran maju fase bergerak, akibatnya hanya molekul-molekul dengan afinitas yang lebih besar terhadap adsorben akan secara selektif tertahan (Khopkar, 2003).

Aplikasi pada proses adsorpsi fase liquid termasuk menghilangkan komponen organik dari air atau larutan organik, pewarna kotoran dari komponen organik, dan bermacam-macam produk fermentasi dari efluen fermentor. Sedangkan aplikasi pada proses adsorpsi fase gas termasuk menghilangkan air dari gas hidrokarbon atau komponen sulfur dari gas alam (Geankoplis, 2003).

Proses adsorpsi skala besar dapat dibagi menjadi dua kelas. Kelas pertama yang paling penting adalah sistem siklik batch menggunakan *fix bed* dijenuhkan kemudian diregenerasi secara siklik. Selanjutnya, sistem aliran secara kontinyu dimana aliran adsorben melalui aliran *feed* secara *countercurrent*. Berikut metode dasar yang sering digunakan untuk adsorpsi siklus batch dengan *fix bed* (Geankoplis, 2003);

### 2.3.1 *Temperature-swing cycle (Thermal Swing Cycle)*

Proses regenerasi adsorben dengan pemanasan menggunakan koil yang tertanam atau dapat juga menggunakan gas purge panas untuk menghilangkan senyawa yang dijerap. Proses adsorpsi selanjutnya bed harus didinginkan.

### 2.3.2 *Pressure-Swing cycle*

Tekanan dikurangi agar bed dapat melepaskan komponen yang dijerap pada temperature konstan kemudian bed dibersihkan pada tekanan rendah dengan aliran produk dalam jumlah sedikit. Pengurangan tekanan pada proses adsorpsi mempengaruhi regenerasi adsorben. Proses ini menggunakan gas dengan siklus yang tidak lama dalam meregenerasi dibandingkan pada proses *Temperature-swing cycle*.

### 2.3.3 *Inert-purge gas stripping cycle.*

Komponen yang terjerap merupakan gas inert yang dilewatkan bed sehingga tidak ada proses adsorpsi yang tampak. Tekanan parsial atau konsentrasi sekitar partikel rendah hingga proses desorpsi terjadi.

### 2.3.4 *Displacement-purge cycle.*

Tekanan dan temperature dijaga tetap konstan untuk proses pembersihan dengan gas stripping namun gas atau liquid yang digunakan untuk mengadsorpsi lebih kuat dari komponen yang akan diadsorpsi.

Proses pemisahan adsorpsi membutuhkan adsorben yang berfungsi sebagai penjerap komponen. Material adsorben yang digunakan harus memiliki karakteristik yang tahan pada kondisi operasi tinggi, tidak rusak oleh aliran gas, dan memiliki ukuran pori tertentu yang hanya dapat menjerap komponen. Banyak adsorben telah dikembangkan untuk pemisahan dalam rentang yang luas. Pada umumnya, adsorben dalam bentuk *small pellet, beads*, atau granula dengan ukuran sekitar 0.1mm hingga 12mm, partikel terbesar menggunakan *packed beds* (Geankoplis, 2003). Berbagai adsorben anorganik maupun organik dapat digunakan; misalkan alumina, bauksit, magnesia, magnesium silikat, kalsium hidroksida, silika gel dan tanah diatome. Diantara adsorben organik, arang gula dan karbon aktif yang paling sering digunakan (Khopkar, 2003). Beberapa adsorben yang sering digunakan dalam pemurnian hidrogen adalah sebagai berikut;

#### 1. *Molecular Sieve*

*Molecular Sieve* adalah material sintetis yang memiliki pori-pori dengan ukuran yang sama persisi dan seragam yang digunakan sebagai adsorben gas dan cairan. Molekul-molekul yang cukup kecil akan diadsorpsi melewati pori-pori, sedangkan molekul-molekul yang lebih besar akan ditolak. Penyaring molekular berbeda dengan penyaring secara umum yang digunakan untuk menyaring molekul pada tingkatan tertentu. Sebagai contoh, adalah molekul air yang mungkin cukup kecil sehingga dapat melewatinya. Oleh karena itu, penyaring molekular sering berfungsi sebagai pengering (*dessicant*). Kemampuan adsorpsi *molecular sieve* terdapat pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4 Kemampuan Adsorpsi *Molecular Sieve***

Ukuran Molecular Sieve	Adsorbat	Keterangan
3A (ukuran pori 3Å)	H <sub>2</sub> O, NH <sub>3</sub> , (tidak C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	Baik untuk pengeringan cairan polar
4A (ukuran pori 4Å)	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , etanol	Tidak akan mengadsorpsi C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> dan hidrokarbon yang lebih tinggi.
5A (ukuran pori 5Å)	Hidrokarbon normal (linier) sampai n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> , alkohol sampai C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH, merkaptan sampai C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> SH	Tidak akan menyerap senyawa-senyawa iso dan bercincin yang lebih besar dari C <sub>4</sub>
10X (ukuran pori 8Å)	Hidrokarbon bercabang dan senyawa aromatik	Berguna untuk pengeringan gas
13X (ukuran pori 10Å)	di-n-butilamin (tetapi tidak tri-n-butilamin)	Berguna untuk pengeringan <i>hexamethylphosphoramide</i> (HMPA)

(Khaidir, 2011)

Penyaring molekular dapat mengadsorpsi air sampai 22% dari berat yang dimilikinya (Gubta & Demirbas, 2010). Penyaring molekular biasanya terdiri dari mineral-mineral aluminosilikat, tanah liat, kaca berpori, arang mikroporous, zeolit, karbon aktif, atau senyawa –senyawa sintesis yang memiliki struktur terbuka yang dapat dilalui oleh molekul-molekul kecil, seperti nitrogen dan air.

## 2. Silica gel

Silika gel merupakan suatu bentuk dari silika yang dihasilkan melalui penggumpalan sol natrium silikat (NaSiO<sub>2</sub>). Dalam proses adsorpsi silika gel merupakan salah satu yang paling sering digunakan sebagai adsorben. Hal ini disebabkan oleh mudahnya silika diproduksi dan sifat permukaan (struktur

geometri pori dan sifat kimia pada permukaan) dan dapat dengan mudah dimodifikasi.

### 3. Zeolite

Zeolit merupakan senyawa kristal alumina silikat dari unsur-unsur golongan IA dan IIA seperti natrium, kalium, magnesium, dan kalsium. Zeolit dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit alam adalah zeolit yang diperoleh dari endapan di alam, sedangkan zeolit sintetis adalah zeolit yang direkayasa dari bahan berkemurnian tinggi, mempunyai jenis kation tunggal, mempunyai ukuran pori, saluran dan rongga tertentu (Mortimer & Taylor, 2002). Zeolit secara umum memiliki ukuran pori yang bervariasi tergantung pada jenis zeolit tersebut.

Beberapa jenis zeolit berdasarkan rasio Si/Al antara lain, zeolit silika rendah dengan perbandingan Si/Al 1 – 1,5, memiliki konsentrasi kation paling tinggi, dan mempunyai sifat adsorpsi yang optimum, contoh zeolit silika rendah adalah zeolit A dan X; zeolit silika sedang, yang mempunyai perbandingan Si/Al adalah 2-5, contoh zeolit jenis ini adalah Mordernit, Erionit, Klinoptilolit, zeolit Y; zeolit silika tinggi, dengan perbandingan kadar Si/Al antara 10 – 100, bahkan lebih, contohnya adalah ZSM-5 (Flanigen, 1980).

Sifat kimia zeolit yang sering dimanfaatkan di bidang pertanian adalah sifat adsorpsi dan sifat pertukaran kation. Adsorpsi yang terjadi pada permukaan padatan atau cairan dapat melibatkan satu atau banyak molekul, tergantung pada permukaan dan jenis gaya yang terlibat. Pertukaran kation zeolit pada dasarnya adalah fungsi dari derajat substitusi silika oleh aluminium dalam struktur kristal zeolit. Semakin banyak jumlah aluminium menggantikan posisi silika, maka semakin banyak muatan negatif yang dihasilkan, sehingga makin tinggi kemampuan tukar kation zeolit tersebut. Zeolit merupakan salah satu dari banyak bahan penukar kation yang mempunyai kapasitas tukar kation yang tinggi (200 - 300 meq/100 g). Kapasitas tukar kation dari zeolit ini terutama merupakan fungsi dari tingkat penggantian atom aluminium (Al) terhadap silikon (Si) dalam struktur kerangka zeolit (Mumpton, 1999).

#### 4. Activated Carbon

Arang aktif merupakan suatu padatan berpori yang mengandung 85-95% karbon, dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon dengan pemanasan pada suhu tinggi. Daya serap ditentukan oleh luas permukaan partikel dan kemampuan ini dapat menjadi lebih tinggi jika terhadap arang tersebut dilakukan aktivasi dengan aktif faktor bahan-bahan kimia ataupun dengan pemanasan pada temperatur tinggi sehingga dikenal dengan karbon aktif

Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300-3500 m<sup>2</sup> /g dan ini berhubungan dengan struktur pori internal yang menyebabkan karbon aktif mempunyai sifat sebagai adsorben. karbon aktif dapat mengadsorpsi gas dan senyawa-senyawa kimia tertentu atau sifat adsorpsinya selektif, tergantung pada besar atau volume pori-pori dan luas permukaan. Daya serap karbon aktif sangat besar, yaitu 25-100% terhadap berat arang aktif.

Pengeringan gas berdasarkan adsorpsi air pada silika gel, alumina, atau padatan anorganik berpori lainnya. Zeolite atau molecular sieves yang alami maupun sintetis dengan struktur pori yang halus yang efektif dalam menghasilkan gas dengan titik embun yang rendah (-75<sup>0</sup>C). Adsorpsi pada molecular sieves dapat juga digunakan untuk memisahkan oksigen dan nitrogen untuk mempersiapkan hidrogen murni dari gas sintesis, dan untuk memisahkan n-parafin dari cabang parafin dan aromatik (Mc Cabe, 2001).

Pada umumnya, adsorben yang digunakan sangat berpori. Proses adsorpsi terjadi pada dinding pori-pori atau bagian spesifik di dalam partikel. Karena pori-pori sangat kecil, maka luas permukaan internal adsorben menjadi besar daripada luas permukaan eksternal yaitu sekitar 500-1000 m<sup>2</sup>/g. Menurut Suzuki (1990) yang menyebutkan bahwa semakin luas permukaan spesifik adsorben maka kemampuan adsorpsi akan semakin meningkat. Karakteristik adsorben yang dibutuhkan untuk adsorpsi antara lain luas permukaan besar sehingga kapasitas adsorpsi tinggi, memiliki aktivitas terhadap komponen yang diadsorpsi, memiliki daya tahan yang baik, dan tidak ada perubahan volume yang berarti selama peristiwa adsorpsi dan desorpsi (Suryawan, 2004). Berikut beberapa adsoben yang digunakan dalam pemisahan gas menggunakan metode adsorpsi yang dapat dilihat pada Tabel 2.5.

**Tabel 2.5 Penggunaan Adsorben pada Pemisahan Gas**

<b>Pemisahan *</b>		<b>Adsorben</b>
<b>I</b>	<b>Pemisahan gas bulk</b>	
	N-Parafin/iso-parafin, aromatik	Zeolite
	N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	Zeolite
	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	<i>Carbon molecular-sieve</i>
	CO, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , Aromatik, NH <sub>3</sub> / H <sub>2</sub>	Zeolite, activated carbon
	Acetone/ <i>vent streams</i>	Activated carbon
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> / <i>vent streams</i>	Activated carbon
	Pemisahan pada komponen parfum	-
<b>II</b>	<b>Pemurnian Gas</b>	
	H <sub>2</sub> O/ olefin (kandungan <i>cracked gas</i> ), gas alam, udara, gas sintesis, dsb	Silika, alumina, zeolite
	CO <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , gas alam, dsb	Zeolite
	Organik/ <i>vent streams</i>	Activated carbon
	Senyawa sulfur/ gas alam, hidrogen, LPG ( <i>liquefied petroleum gas</i> ), dsb	Zeolite
	Solven/ udara	Activated carbon
	<i>Odors</i> /udara	Activated carbon
	NO <sub>x</sub> /N <sub>2</sub>	Zeolite
	SO <sub>2</sub> / <i>vent streams</i>	Zeolite
	Hg/ Cl (gas efluen alkali)	zeolite

\*Adsorbat dicantumkan pertama

(Ralph T. Yang, 1986)

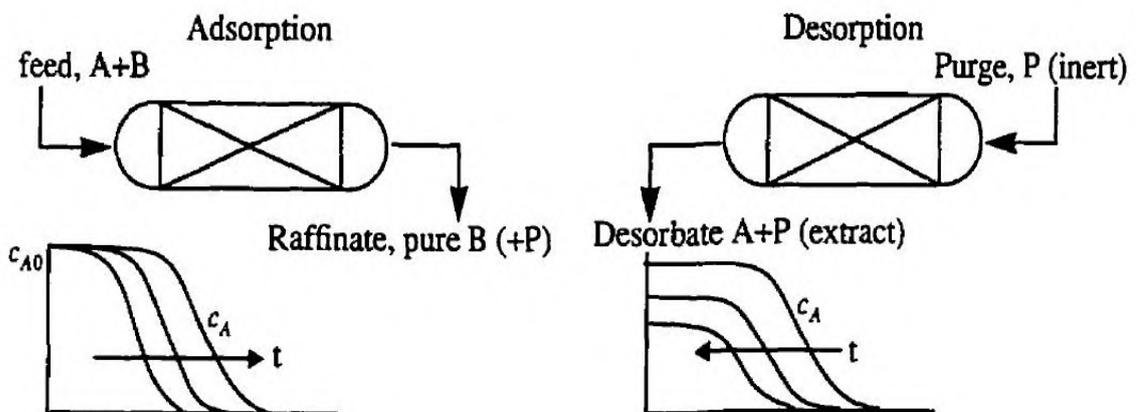
Beberapa penelitian menggunakan karbon aktif dalam memurnikan hidrogen. Pada penelitian Majlan (2009), pemurnian hidrogen untuk bahan bakar sel menggunakan karbon aktif menghasilkan hidrogen murni 99,999% atau 0,04 kg H<sub>2</sub>/kg adsorben. Penelitian ini menggunakan CPSA didesain dengan mengkombinasi 4 bed adsorpsi yang beroperasi secara simultan. Selain itu penelitian Lopes (2011) yang menghasilkan hidrogen murni 99,981% dan recovery

hidrogen sebesar 81,6% dari multikomponen yang dikerjakan dengan berbeda kondisi operasi menggunakan karbon aktif kemudian divalidasi dengan permodelan matematika.

#### 2.4 Pressure Swing Adsorption (PSA)

Dasar dari metode ini adalah adsorpsi gas dalam kondisi tekanan tertentu. *Pressure Swing Adsorption* merupakan proses yang paling tersebar luas dan ekonomis untuk pemurnian hidrogen, pemisahan udara dan pengering udara skala kecil. PSA mengacu pada fakta bahwa dalam kondisi tekanan tinggi, gas cenderung untuk tertarik ke permukaan padat (*ter-adsorp*). Makin tinggi tekanan, maka makin banyak gas yang dapat *ter-adsorp* seperti pada Gambar 2.4. Adsorpsi sering digunakan dalam proses pemurnian untuk menghilangkan sejumlah komponen. Pemisahan campuran gas sehingga menghasilkan konsentrasi yang tinggi.

Kolom adsorpsi (*bed*) berisi adsorben. Selama langkah adsorpsi, gas umpan memasuki bed dari lubang masuk hingga bed ditekan oleh gas umpan sedangkan gas produk A dikumpulkan dari lubang keluar. Selama langkah desorpsi, tekanan bed diturunkan dengan mengalirkan gas pembersih. Langkah memasukkan umpan diberhentikan sebelum komponen teradsorpsi lebih kuat ke dalam bed, ketika langkah regenerasi dihentikan sebelum bed penuh dengan gas pembersih. Tekanan adsorben berubah setiap siklus pemisahan berlangsung (Lin Lin, 1997).

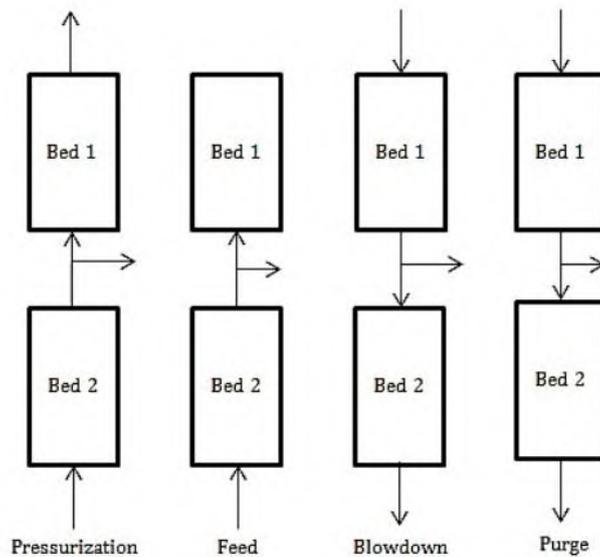


Gambar 2.4 Konsep Proses PSA

*Pressure Swing Adsorption* (PSA) adalah proses pemisahan bulk yang digunakan oleh pabrik pemisahan udara skala kecil. PSA sederhana pada pemisahan udara menggunakan dua bed dengan adsorben moluculer sieve. Bed satu melakukan adsorpsi pada tekanan atmosfer dan bed dua melakukan regenerasi pada 1 atm. Pada konsentrasi yang sama, nitrogen diadsorpsi tiga sampai empat kali lebih kuat daripada oksigen, sehingga oksigen murni dapat diproduksi (Mc Cabe, 2001).

Prinsip metode ini adalah gas ditekan memasuki *zeolit molecular sieve* atau *carbon molecular sieve* yang berfungsi sebagai adsorben. Karbon bisa digunakan untuk memproduksi nitrogen. Zeolit biasa digunakan untuk meng-*adsorp* yang tinggi terhadap oksigen. Selain itu, karena tekanan parsial oksigen yang lebih rendah, maka nitrogen akan ter-*adsorp* lebih banyak dan udara kaya oksigen akan dikeluarkan pada *outlet* untuk diolah. Suatu sistem PSA melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi dimana sejumlah *vessel* dihubungkan yang berisi adsorben mengalami ekualisasi tekanan untuk penyerapan produk dan regenerasi adosrben.

Dasar sistem PSA diusulkan oleh Skartstrom (1957) yang masih berdasar pada proses PSA sebenarnya yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Proses yang menggunakan dua bed yang bergantian melakukan empat tahap yaitu *pressurization*, adsorpsi (dengan gas umpan), *countercurrent blowdown* dan *countercurrent purge*.



**Gambar 2.5** Langkah Siklus Proses *Pressure Swing Adsorption*

Ketika beroperasi, proses PSA memproduksi paling tidak dua aliran. Pada langkah adsorpsi, komponen yang tidak terjerap pada adsorben biasanya dikenal *light product* atau aliran rafinat. Sedangkan pada proses desorpsi, aliran komponen yang terjerap kuat pada adsorben biasa dikenal *heavy product* atau aliran ekstrak (Biswas dkk, 2010).

Kemampuan efisiensi unit PSA bergantung pada kombinasi yang terbaik dari variabel proses seperti panjang bed, laju alir, waktu siklus, perbandingan tekanan, dan perbandingan *purge to feed* (P/F). Interaksi variabel proses dan kinetika atau parameter kesetimbangan sangat rumit untuk mencapai kondisi optimal. Simulasi matematika dibutuhkan dalam mendesain kondisi optimal pada PSA. Persamaan diferensial parsial digunakan untuk mendeskripsikan perilaku dinamik tiap langkah pada sistem PSA. Banyak penelitian mengenai permodelan dan analisis PSA yang sudah dilakukan berdasarkan pada kondisi isothermal (Lin Lin, 1997).

Penelitian yang dilakukan oleh Javadi (2014) mempelajari penurunan numerik PSA dengan model matematika dan simulasi numerik. Permodelan yang digunakan berdasarkan neraca massa, neraca energi, dan neraca momentum. Pada penelitian ini menggunakan metode Runge-Kutta dengan variabel operasi *purity* dan *recovery* hidrogen. Selain itu, penelitian yang dilakukan Zargaran (2011) menggunakan PSA untuk memisahkan hidrogen dari hidrogen sulfida ( $H_2S$ ). Hidrogen sulfida dihilangkan dengan alkanolamine (dietanolamin) berdasarkan proses Claus di simulasikan di Aspen Plus.

Salah satu industri yang menggunakan proses PSA adalah PT. Linde yang memiliki kelebihan antara lain *quality* dan *reliability* dimana persyaratan proses PSA membuat komponen yang dipilih menjadi hasil dominan sesuai kebutuhan, *outstanding availability* dimana penggunaan PSA sering digunakan untuk menyediakan produk hidrogen dengan memperhatikan jumlah adsorber, dan *excellent flexibility* dimana sistem PSA Linde mencapai fleksibilitas yang sangat baik dalam menghadapi berbagai kondisi gas umpan.

Penggunaan sistem PSA pada PT. Linde memiliki kapasitas dari industri kecil yang memiliki aliran umpan gas masuk ratusan  $Nm^3/h$  hingga mencapai industri skala besar dengan aliran umpan gas masuk 400.000  $Nm^3/h$ . Sistem PSA ini

cocok untuk sejumlah aplikasi yang berbeda mulai dari *refining*, petrokimia, pembuatan besi-baja, dan perusahaan tambang. Penggunaan sistem PSA pada PT. Linde antara lain;

#### 2.4.1 Pemurnian dan *Recovery* Hidrogen

Penggunaan PSA di industri untuk pemurnian dan *recovery* hidrogen dari *raw* gas seperti gas sintesis dari *steam reforming*, oksidasi parsial atau proses gasifikasi, serta *refinery off-gases*, *ethylene off-gases*, *coke oven gases*, pembersihan gas metanol dan amonia. Produk hidrogen yang didapat setiap pemurnian mencapai 99,9999 %mol dan juga mencapai *recovery* tertinggi.

#### 2.4.2 *Recovery* dan *removal* karbon dioksida

Proses menghilangkan karbon dioksida dapat menggunakan PSA dan VPSA (*Vacuum Pressure Swing Adsorption*) secara langsung pada industri pembuatan besi. PSA/VPSA juga dapat digunakan untuk pemurnian dan *recovery* karbon dioksida dari bermacam-macam *raw* gas.

#### 2.4.3 Penghasil oksigen

Produk oksigen dengan kemurnian sekitar 90% hingga 94% dan kapasitas mencapai 6000Nm<sup>3</sup>/h paling efektif menggunakan proses VPSA (*Vacuum Pressure Swing Adsorption*). Kelebihan dari proses ini adalah konsumsi energi spesifik rendah dan pengoperasian sederhana pada saat memulai dan mematikan operasi.

#### 2.4.4 Penghasil nitrogen

Proses PSA juga menyediakan nitrogen dengan kapasitas mencapai 5000 Nm<sup>3</sup>/h dan kemurnian sekitar 98% hingga 99,9% (bahkan lebih tinggi).

### 2.5 Pemurnian Hidrogen dengan *Pressure Swing Adsorption*

Beberapa proses PSA untuk pemurnian hidrogen terdapat di literatur dengan berbeda konfigurasi. Konfigurasi ini cukup bervariasi dari jumlah bed yang digunakan, jumlah langkah-langkah yang digunakan, jumlah langkah equalisasi tekanan tangki yang dilakukan, adsorben yang digunakan termasuk jumlah layer adsorben dan posisinya, persamaan yang digunakan dalam permodelan maupun perhitungan untuk beberapa parameter (Lin Lin, 1997).

Penelitian yang memiliki tujuan mengestimasi waktu PSA dalam memurnikan hidrogen menggunakan 5A molekuler sieve ini dilakukan oleh Sadighi

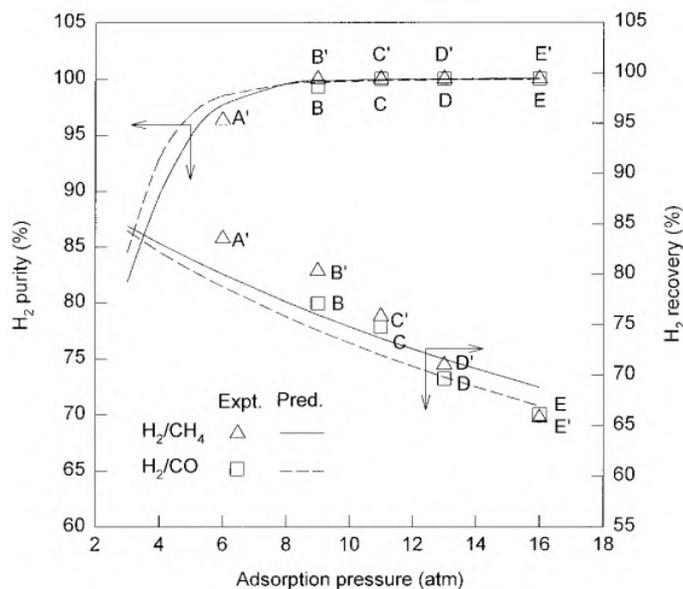
(2014). Permodelan matematika diselesaikan dengan Aspen Adsorption kemudian dihitung waktu proese PSA dan dibandingkan dengan data industri. Hasil yang didapat menunjukkan waktu yang diestimasi mendekati nilai sebenarnya dari data industri. Sedangkan penelitian yang dilakukan Sol Ahn (2011) yang membandingkan pengaruh lapisan adsorben pada pemisahan hidrogen dari gas batubara. Hasil yang didapat pada lapisan zeolite dengan 2 bed PSA lebih baik digunakan untuk memisahkan nitrogen sedangkan lapisan 4 bed PSA lebih baik menghasilkan hidrogen sekitar 96% hingga 99,5% untuk kemurnian dan 71% hingga 85% untuk recovery hidrogen.

Penggunaan PSA *multilayer* dilakukan oleh Elbrahimi (2011) yang mengembangkan proses PSA dengan dua lapis kolom dalam pemurnian hidrogen dari produk *steam reforming methane*. Dalam penelitian ini, adsorben yang digunakan adalah karbon aktif dan zeolite 5A dengan sembilan proses yang berlangsung kontinyu. Sembilan langkah tersebut meliputi adsorpsi, dua tahap ekualisasi pada mode desorpsi, *purge*, *dump*, *purge*, dua tahap ekualisasi pada adsorpsi dan represurisasi dengan produk. Penelitian ini berdasarkan permodelan matematika yang disimulasikan pada program MATLAB.

Penelitian proses PSA *multibed* oleh Doong dkk (1986) yang memodelkan PSA *multibed* berdasarkan pemurnian dan *recovery* hidrogen menggunakan adsorben zeolite 5A. Pemisahan variabel dengan proses PSA berdasarkan efek perbandingan *purge to feed*, *total cycle time*, tekanan akhir dari cocurrent blowdown dan suhu ambient. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Nikolic dkk (2007) yang mengembangkan proses PSA dengan merancang dan memodelkan berdasarkan beberapa konfigurasi PSA untuk memurnikan hidrogen dan karbon dioksida dari SMROG (*steam methane reforming off-gas*). Berdasarkan sistem industri yang sudah ada, memperbarui dan memodifikasi konfigurasi PSA terdiri dari dua grup kolom adsorpsi dengan berbeda langkah pada siklusnya yang sudah dirancang dan disimulasikan dengan susunan permodelan. Hasil simulasi dibandingkan dengan proses yang sudah ada sebelumnya.

Proses PSA yang diteliti oleh Lopes dkk (2012) dengan tujuan menentukan efek kinetika dari komponen biner sebagai batas proses PSA menggunakan adsorben karbon aktif. Beberapa simulasi digunakan untuk menentukan efek dari

variabel proses yang ditunjukkan berdasarkan permodelan matematika. Proses yang berlangsung antara lain tahap co-current umpan, tahap co-current depresurisasi, countercurrent blowdown, counter-current purge dengan hidrogen dan co-current presurisasi dengan umpan. Penelitian terdahulu yang akan dijadikan sebagai validasi adalah penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) mengenai Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A. Efek variasi tekanan pada kemurnian hidrogen dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6 Efek Variasi Tekanan pada Kemurnian Hidrogen**

Adapun tujuan dari penelitian tersebut adalah mengembangkan parameter operasi terhadap kinerja PSA dengan model matematika. Pada penelitian tersebut menghasilkan kemurnian hidrogen pada tekanan optimum 8 bar. Beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan untuk mendapatkan kemurnian hidrogen menggunakan sistem *Pressure Swing Adsorption* terdapat pada Lampiran 6. Langkah dalam mendapatkan kemurnian hidrogen menurut penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) terdiri dari *Feed Pressurization* (FP), *Adsorption* (AD), *Depressurizing Pressure Equalization* (DPE), *Depressurization* (DP), *Purge* (P), dan *Pressurizing Pressure Equalization* (PPE). Step tersebut bekerja mengikuti

*cycle sequence* seperti pada Tabel 2.6 dan pada Lampiran 8 terdapat *cycle sequence* yang ditampilkan dalam *cycle organizer* pada Aspen Adsorption.

**Tabel 2.6 Cycle Sequence pada PSA 2 bed**

	Step					
	I	II	III	IV	V	VI
<b>Bed 1</b>	FP	AD	DPE	DP	PG	PPE
<b>Bed 2</b>	DP	PG	PPE	FP	AD	DPE
<b>Waktu (s)</b>	30	40	140	30	40	140

## 2.6 Simulasi Pressure Swing Adsorption dengan Aspen Adsorption

*Fluid Package* adalah model perhitungan termodinamika yang digunakan. Ini tergantung dari sifat fisis dan kimia dari komponen yang digunakan dan produk yang dihasilkan. Pengetahuan dasar tentang termodinamika fluida diperlukan dalam menentukan package ini. Pemilihan *fluid package* dalam penelitian Chen dan Mathias (2002) berdasarkan model termodinamika yang tercantum pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7 Pemilihan Model Termodinamika dalam Proses Industri**

Chemical System	Primary Choice Models of Tod	Secondary Choice Models	Problem Areas
Air Separation	PR,SRK	Corresponding States	
Gas Processing	PR, SRK	BWRS	
Gas Treating	Kent-Eisenberg, Electrolyte NRTL		Data, parameters, models for mixed amine
Petroleum Refining	BK10, Chao-Seader, Grayson-Streed, PR, SRK, Lee-Kessler-Plocker		Heavy crude characterization

Petrochemicals-VLE	PR, SRK, PSRK	NRTL, UNIQUAC, UNIFAC	Data, parameters
Petrochemicals-LLE	NRTL, UNIQUAC		Data, parameters, models for VLLE
Chemicals	NRTL, UNIQUAC, PSRK	UNIFAC	Data, parameters
Electrolytes	Electrolyte, NRTL, Zemaitis	Pitzer	Data, parameters, databanks, model for polyelectrolytes
Polymers	Polymer NRTL, PC-SAFT	Sanchez-Lacombe EoS, UNIFAC-FV	Data, parameters, databanks, flash algorithms, models for polar polymers, block copolymers
Environmental	UNIFAC+Henry's Law		Data
Pharma/Biological	None		Data, databanks, models

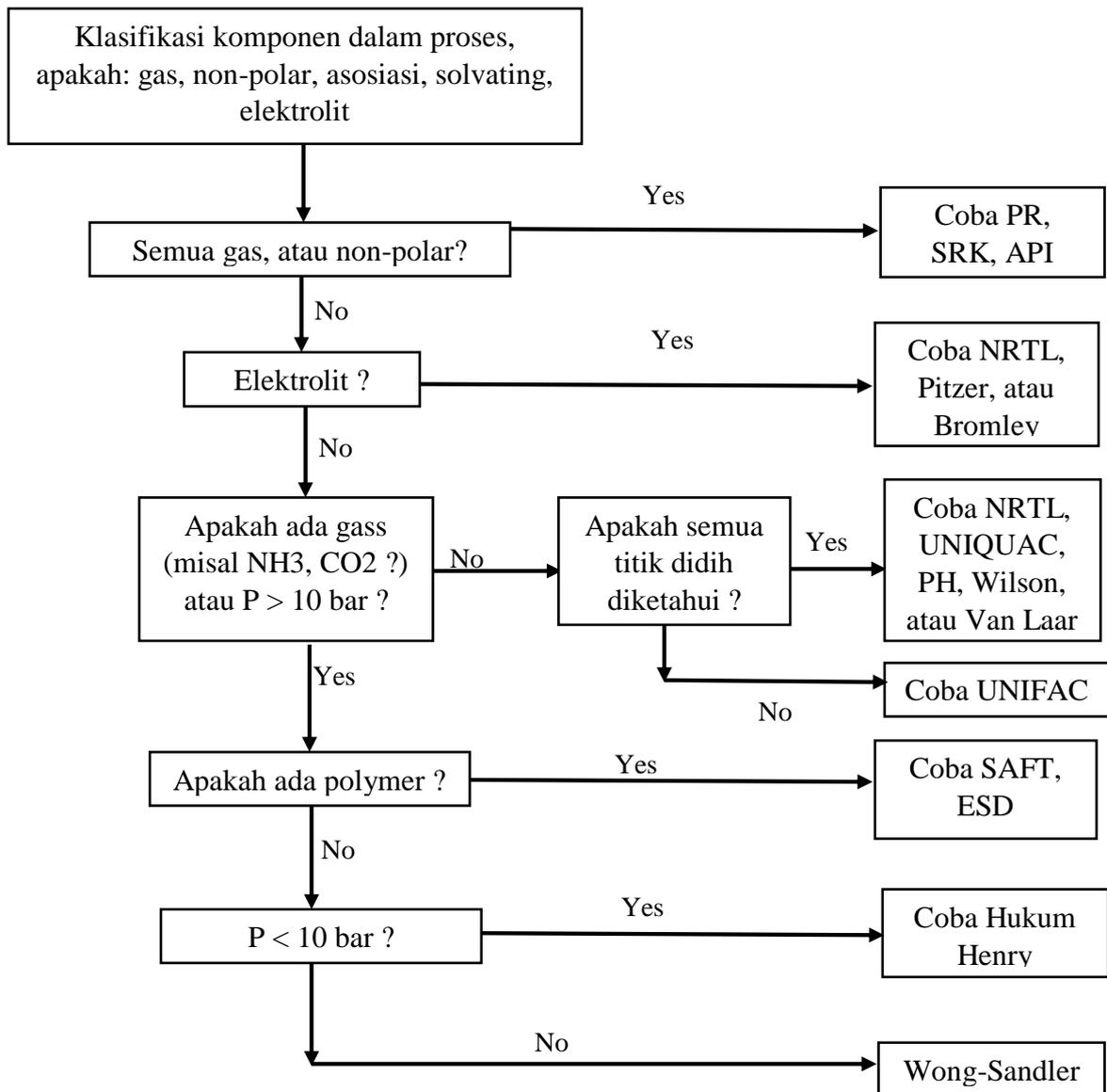
Persamaan keadaan Peng Robinson ini telah dimutakhirkan sedemikian rupa sehingga kalkulasi kesetimbangan fasa bisa mempunyai keberlakuan untuk sistem temperatur rendah kriogenik sampai temperatur tinggi dan tekanan tinggi di sistem reservoir. Berdasarkan informasi dari pengembang Hysys, EOS *Peng-Robinson* adalah yang direkomendasikan untuk dipakai dalam aplikasi minyak, gas dan petrokimia. Selain itu dari pengembang AspenTech (2011) seperti Hysys sendiri mempunyai tabel yang mentabulasikan kesesuaian property method terhadap aplikasi selain migas dan petrokimia yang dicantumkan pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8 Property Method Terhadap Aplikasi Selain Migas Dan Petrokimia**

<b>Type of system</b>	<b>Recommended property method</b>
TEG Dehydration	PR
Sour Water	PR, Sour PR
Cryogenic Gas Processing	PR, PRSV
Air Separation	PR, PRSV
Atm Crude Tower	PR, PR Options, GS
Vacuum Towers	PR, PR Options, GS (<10mmHg), Braun K10, Esso K
Ethylene towers	Lee Kesler Plocker
High H <sub>2</sub> Systems	PR, ZJ atau GS
Steam System	Steam Package, CS atau GS
Hydrate Inhibition	PR
Chemical system	Activity models, PRSV
HF Alkylation	PRSV, NRTL (Contact Hyprotech)
TEG Dehydration with Aromatics	PR (Contact Hyprotech)
Hydrocarbon system where H <sub>2</sub> O solubility in HC is important	Kabadi Danner
System with select gases and light hydrocarbons	MBWR

(AspenTech, 2011)

Pemilihan model termodinamika mengikuti acuan pada artikel yang ditulis oleh Chen dan Mathias (2002) seperti pada Gambar 2.7 sebagai berikut;



**Gambar 2.7 Diagram Alir Acuan Pemilihan Model Termodinamika**

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tahap Penelitian

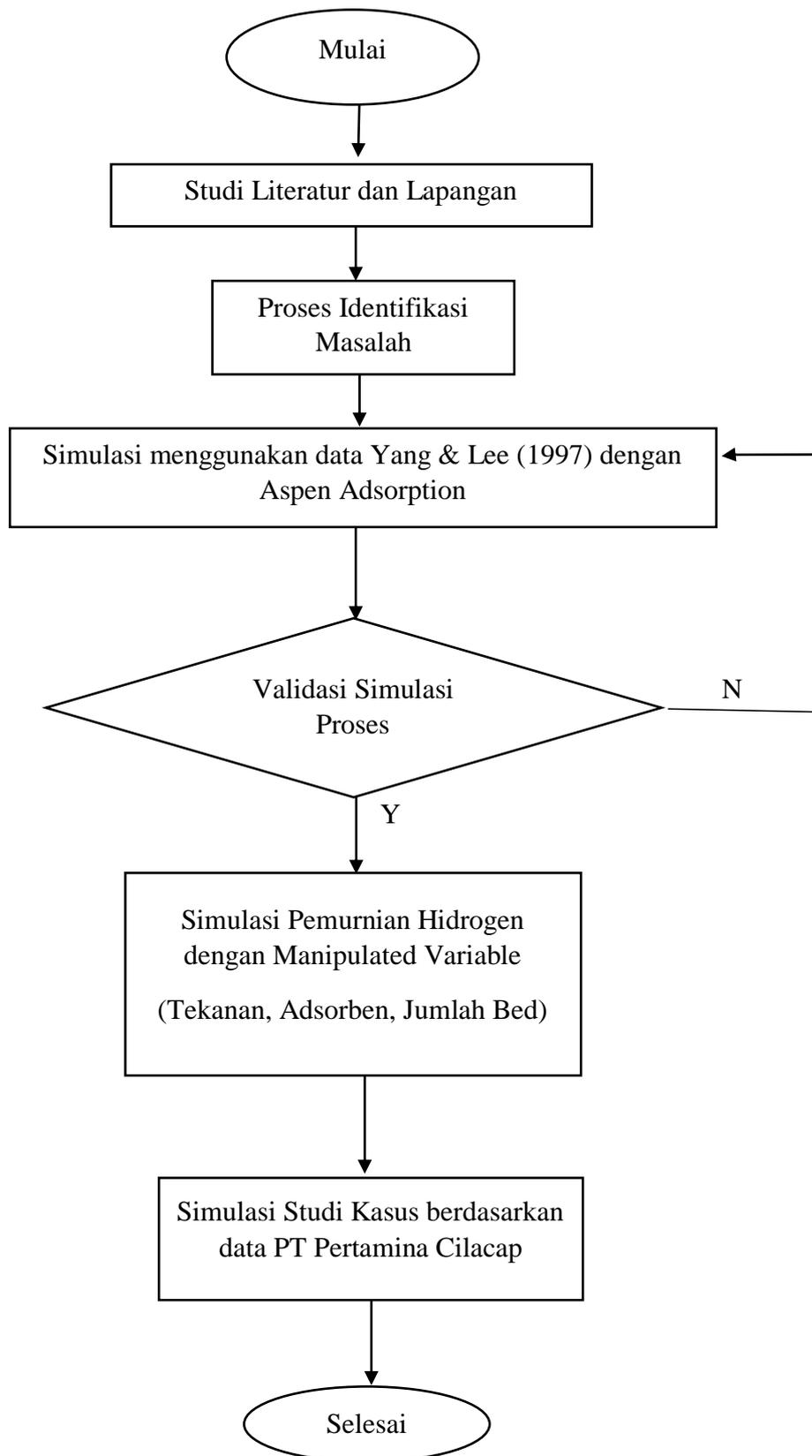
Pada Bagian ini berisi metodologi yang memandu pelaksanaan penelitian, digambarkan melalui proses pengambilan keputusan untuk mendapatkan desain optimisasi sistem PSA (*Pressure Swing Adsorption*) pada pemurnian dan *recovery* hidrogen.

Metode yang dimaksud adalah suatu acuan dalam melakukan urutan-urutan kerja atau langkah-langkah analitis yang disusun secara benar dan teratur agar topik permasalahan bisa diselesaikan secara tepat dan dapat dipertanggungjawabkan. Pertama dilakukan pendefinisian masalah, dimana penelitian difokuskan pada bahasan-bahasan tertentu untuk mencegah perluasan pembahasan dan *overlapping*. Untuk mendapatkan bahasan yang jelas, maka dilakukan pendefinisian batas sistem. Selanjutnya menentukan variabel yang akan dioptimasi dan kemudian membuat deskripsi proses untuk optimisasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan rancangan sistem PSA yang dilihat berdasarkan kemampuan adsorben dalam menjerap *impurities* pada proses pemurnian hidrogen. Dalam hal merancang sistem PSA juga memperhatikan aspek kondisi operasi peralatan dalam penghematan energi untuk menghasilkan produk hidrogen dengan kemurnian tinggi. Penelitian dibagi dalam beberapa tahap yaitu;

- a. Identifikasi masalah yang didapat setelah melakukan studi literatur dan studi lapangan.
- b. Penyelesaian masalah dengan simulasi *dynamic* menggunakan Aspen Adsorption.
- c. Penggunaan program simulasi untuk mencapai kondisi operasi optimal.

Bagan langkah penelitian yang dibuat dalam menyelesaikan topik permasalahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1 Diagram Metodologi Penelitian**

### **3.2 Studi Literatur dan Lapangan**

Pada perencanaan penelitian ini, studi literatur diperlukan untuk mengumpulkan data yang akan digunakan dalam merancang sistem PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Studi ini juga bertujuan untuk mengetahui kondisi operasi peralatan dan adsorben yang akan digunakan dalam merancang sistem PSA sehingga dapat menghemat energi dari utilitas luar dan biaya yang dikeluarkan dalam menghasilkan produk. Data yang digunakan dalam tahap pengumpulan data ini meliputi:

- a. Proses yang terjadi dalam adsorber PSA
- b. Kondisi operasi
- c. Komposisi umpan
- d. Spesifikasi adsorber

Tahap studi lapangan adalah tahapan lanjutan dari studi literatur yang sudah dan masih dipelajari. Studi lapangan ini bertujuan membuktikan informasi maupun parameter proses yang ada pada literatur mengenai PSA (*Pressure Swing Adsorption*).

### **3.3 Proses Identifikasi Masalah**

Setelah melewati proses studi literatur dan studi lapangan maka dilanjutkan pada proses identifikasi hal-hal apa saja yang perlu dievaluasi dari pemurnian dan *recovery* hidrogen dengan sistem PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Proses identifikasi permasalahan ini dilakukan dalam bentuk diskusi maupun presentasi dengan beberapa pihak terkait seperti *process engineer*, operator industri, dan dosen pembimbing.

### **3.4 Simulasi menggunakan data Yang & Lee (1997) dengan Aspen Adsorption**

Setelah permasalahan berhasil diidentifikasi maka dilakukan analisa dengan bantuan *software* simulasi Aspen Adsorption pada sistem PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Di dalam penelitian ini, untuk mendekati kondisi simulasi dengan kondisi lapangan maka sangat diperlukan kondisi operasi yang akurat untuk dimasukkan pada Aspen Properties. Pemilihan model termodinamika mengikuti

acuan pada artikel yang ditulis oleh Chen dan Mathias (2002) seperti pada Gambar 2.7

Pemisahan udara dapat menggunakan model termodinamika PR (Peng-Robinson) atau SRK (Soave-Redlich-Kwong). Model termodinamika yang digunakan dalam penelitian ini adalah Peng-Robinson. Pemilihan Peng Robinson dalam pemurnian hidrogen diinputkan ke dalam Aspen Properties yang tercantum pada Lampiran 6. Kondisi operasi yang digunakan pada penelitian adalah Peng-Robinson yang cocok terhadap pemisahan gas. Gas yang dipisahkan merupakan campuran dari metana, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan nitrogen (N<sub>2</sub>). Komponen tersebut diinputkan ke dalam Aspen Properties seperti Lampiran 7.

Berdasarkan data yang berasal dari penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) yang berjudul “*Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A*” memiliki komposisi feed yang tercantum pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Data Komposisi Feed**

<b>Komponen</b>	<b>Komposisi</b>
CH <sub>4</sub>	0,266
CO	0,084
CO <sub>2</sub>	0,031
H <sub>2</sub>	0,564
N <sub>2</sub>	0,055
total	1

Data komposisi yang terdapat pada penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) tersebut akan diinput ke Aspen Adsorption sebagai aliran feed. Selain itu, data karakteristik bed adsorpsi dan adsorben yang akan diinput ke dalam Aspen Adsorpsi telah dicantumkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2 Karakteristik Bed Adsorpsi dan Adsorben**

<b>Karakteristik</b>	<b>Spesifikasi</b>	<b>Nilai</b>	<b>Satuan</b>
<b>Bed Adsorpsi</b>	<i>bed density</i>	746	kg/m <sup>3</sup>
	<i>Void fraction</i>	0,35	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed
	<i>Total void fraction</i>	0,76	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed
	<i>Bed lenght</i>	100	cm
	<i>Collumn heat capacity</i>	0,119977	cal/gm/k
	<i>Collumn wall thickness</i>	0,00134	m
<b>Adsorben</b>	<i>Particel radius</i>	0,00157	m
	<i>Particle porosity</i>	0,65	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bead
	<i>Particle density</i>	1160	kg/m <sup>3</sup>
	<i>Heat capacity</i>	0,219953	cal/gm/k

### 3.5 Validasi Simulasi Proses

Simulasi yang dilakukan menggunakan data, informasi, parameter, maupun kondisi operasi yang didapatkan dalam studi lapangan dan literatur. Pada tahap ini dilakukan pengecekan apakah hasil simulasi dengan menggunakan Aspen Adsorption memberikan hasil yang sama dengan penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997). Apabila hasil simulasi dengan menggunakan Aspen Adsorption memberikan hasil yang sama dengan hasil dari penelitian, maka desain PSA dapat dimonitoring dengan program Aspen Adsorption.

### 3.6 Pengaruh *Manipulated Variable* PSA (*Pressure Swing Adsorption*)

Pada penelitian ini menggunakan variabel yang dimanipulasi adalah tekanan dan jenis adsorben yang digunakan serta jumlah bed adsorber pada PSA. Tekanan yang digunakan memiliki range sekitar 2 bar hingga 10 bar sedangkan data yang digunakan pada PT Pertamina Cilacap memiliki tekanan yang cukup tinggi yaitu 34 bar. Selain itu jenis adsorben juga menjadi variabel yang dimanipulasi yaitu molecular sieve, zeolite, silica gel dan activated carbon yang sebagian besar merupakan adsorben yang sering digunakan dalam pemurnian hidrogen.

Penggunaan 2 bed adsorber PSA seperti yang ditunjukkan pada penelitian Yang & Lee (1997). Sedangkan data existing condition mengikuti PT Pertamina

RU IV Cilacap yang menggunakan 4 bed adsorber. Sehingga jumlah bed baik 2 bed dan 4 bed akan menjadi variabel yang diubah-ubah dalam penelitian.

### 3.7 Simulasi dengan menggunakan Data Existing Condition

Setelah diubah ke kondisi dinamik, selanjutnya dilakukan simulasi ulang dengan menggunakan data sebenarnya untuk mengetahui *performance* dari industri gas pada keadaan *existing*. Industri yang menggunakan PSA dalam memurnikan hidrogen adalah PT Pertamina Cilacap yang menghasilkan hidrogen murni sekitar 99,5%. Pada penelitian menggunakan data yang didapat dari Refinery Unit IV PT Pertamina Cilacap dengan spesifikasi *flowrate*, tekanan, temperature serta komposisi yang tercantum pada Tabel 3.3.

**Tabel 3.3 Spesifikasi Neraca Massa Unit PSA**

	Feed	Product	Tail Gas
Flow (Nm <sup>3</sup> /hr)	20.014	13.015	6.999
Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	34	33	4
Temperature (°C)	47	52	42
Komposisi (%)			
H <sub>2</sub>	87,44	99,5	65,02
CH <sub>4</sub>	2,39	0,5	5,92
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,66		7,61
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,88		5,38
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,8		2,29
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,64		1,83
i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2,35		6,72
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1,59	< 1	4,55
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,24	< 30	0,68
He		< 1	< 1
CO+CO <sub>2</sub>		< 30	< 1
H <sub>2</sub> S		< 1	< 30
H <sub>2</sub> O		< 1	< 1

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

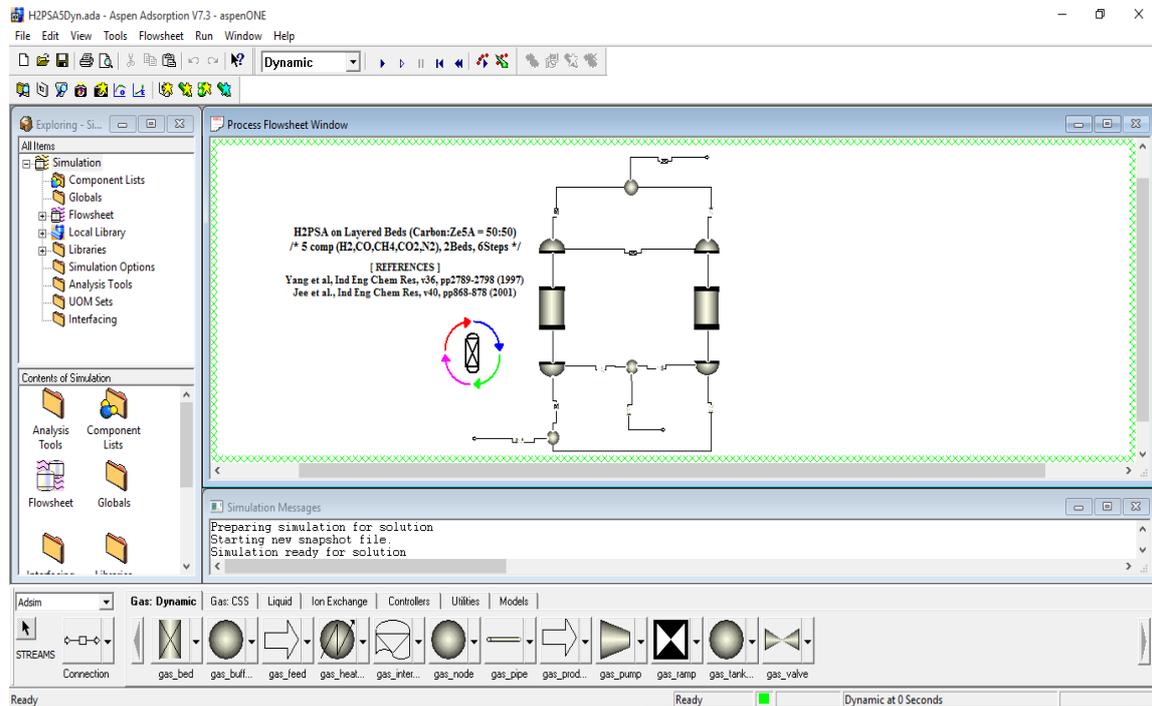
Penelitian dengan tujuan untuk menentukan pengaruh tekanan yang paling optimal dalam memurnikan hidrogen menggunakan PSA (*Pressure Swing Adsorption*) dan menentukan pengaruh jenis, ukuran dan bentuk adsorben yang paling baik dalam mengadsorpsi *impurities* pada proses pemurnian hidrogen. Sehingga akan mendapatkan kondisi optimal optimisasi untuk pemurnian hidrogen menggunakan *Pressure Swing Adsorption* (PSA) yang disimulasikan dengan software Aspen Adsorption dengan memperhatikan aspek kondisi operasi peralatan dan adsorben yang digunakan oleh PSA dalam penghematan energi dari utilitas luar yang sangat berhubungan erat dengan waktu dan biaya dalam menghasilkan produk.

#### **4.1 Validasi Simulasi Proses**

Validasi simulasi proses ini berguna untuk mengetahui kelayakan proses PSA dalam memurnikan hidrogen. Penelitian untuk pemurnian hidrogen ini akan disimulasikan menggunakan Aspen Adsorption. Validasi yang dilakukan dalam penelitian berdasarkan Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) yang berjudul “*Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A*” memiliki komposisi feed yang telah dicantumkan pada Tabel 3.1. Data komposisi yang terdapat pada studi tersebut akan diinput ke Aspen Adsorption sebagai aliran feed. Selain itu, data karakteristik bed adsorpsi dan adsorben yang akan diinput ke dalam Aspen Adsorption telah dicantumkan pada Tabel 3.2.

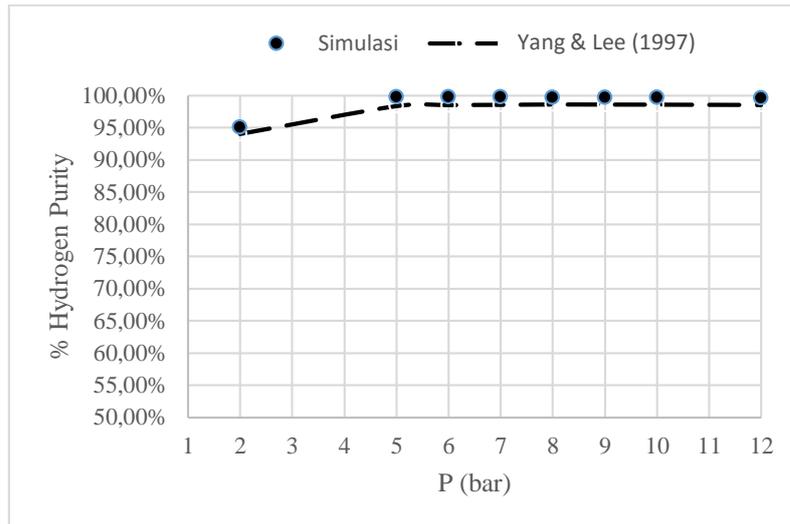
Validasi simulasi proses pemurnian hidrogen menggunakan Aspen Adsorption. Kondisi operasi yang digunakan pada validasi proses dalam penelitian ini adalah Peng-Robinson yang cocok terhadap pemisahan gas. Gas yang dipisahkan merupakan campuran dari metana, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hidrogen (H<sub>2</sub>) dan nitrogen (N<sub>2</sub>). Komposisi yang terdapat pada Tabel 3.1 tersebut diinputkan ke Aspen Adsorption. Data karakteristik *bed adsorption* dan adsorben pada simulasi mengikuti penelitian Jaeyoung Yang dan

Chang Ha Lee (1997) juga diinputkan ke dalam Aspen Adsorption yang telah ditunjukkan pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1 Validasi Simulasi Proses Pemurnian Hidrogen**

Variabel yang diubah dalam validasi proses pada penelitian ini adalah tekanan dan jenis adsorben. Tekanan dan jenis adsorben yang digunakan memiliki pengaruh terhadap proses pemurnian hidrogen menggunakan PSA. Simulasi Aspen Adsorption yang divalidasi menggunakan data dari penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) dengan perubahan tekanan yang bervariasi yang memiliki range 2 bar hingga 10 bar. Hasil validasi simulasi proses PSA menggunakan Aspen Adsorption dengan perubahan tekanan menunjukkan semakin tinggi tekanan maka kemurnian hidrogen menjadi menurun. Sedangkan komposisi karbon dioksida yang dihasilkan semakin meningkat. Hasil simulasi yang didapat dapat dilihat secara grafis pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2 Grafik Hasil Simulasi Proses Pemurnian Hidrogen**

Berdasarkan hasil simulasi yang dilihat dari Gambar 4.2 dapat dikatakan bahwa tekanan yang paling optimum dalam memurnikan hidrogen pada tekanan 7 bar. Tekanan dibawah 7 bar menunjukkan kemurnian hidrogen semakin turun dikarenakan mendekati tekanan atmosfer. Selain itu semakin naik tekanan adsorpsi di atas 7 bar, maka kemurnian hidrogen semakin menurun.

Efek tekanan adsorpsi berdasarkan hasil dari penelitian Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee (1997) menunjukkan bahwa kemurnian hidrogen akan menurun cukup cepat pada tekanan sekitar 8 atm sedangkan recovery hidrogen yang semakin turun saat tekanan yang semakin rendah. Turunnya recovery hidrogen dikarenakan hilangnya hidrogen selama *depressurization pressure*. Pada umumnya, semakin sering proses penyamaan tekanan pada proses PSA maka akan mengurangi kerugian gas yang terbuang ke atmosfer. Namun kondisi tersebut membutuhkan bed adsorpsi yang lebih banyak sehingga akan meningkatkan biaya operasi untuk menghasilkan kemurnian hidrogen.

#### **4.2 Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan Aspen Adsorption**

Hubungan antara banyaknya zat yang dapat diadsorpsi dengan suhu dan konsentrasi dapat diberikan secara grafik yang dikenal sebagai isotherm adsorpsi. Pada suhu tetap jumlah molekul yang dapat diadsorpsi pada suatu permukaan bergantung pada tekanan gas atau konsentrasi larutan. Hal pertama dalam desain

sistem PSA adalah untuk memilih adsorben. Selanjutnya memperoleh kondisi isoterm yang relevan dan properti lainnya dengan memperkirakan recovery produk yang diinginkan pada berbagai tekanan operasi (dengan asumsi bahwa kemurnian produk optimum), dan akhirnya memperkirakan biaya adsorben pada total biaya.

Umumnya, sistem PSA dirancang sebagai dua atau lebih bed yang bekerja secara paralel. Pemurnian hidrogen dengan PSA secara luas digunakan dalam kimia dan minyak bumi industri penyulingan adalah salah satu proses PSA khas multibed menggabungkan banyak langkah PSA dalam berbagai cara. Efeknya parameter operasi khas pada kinerja PSA, seperti tekanan adsorpsi, rasio P / F, dan beberapa langkah kali termasuk adsorpsi / pembersihan dan tekanan pemerataan langkah, dipelajari secara eksperimental. Mengembangkan pemahaman proses ini, dampak dari parameter operasi terhadap kinerja PSA.

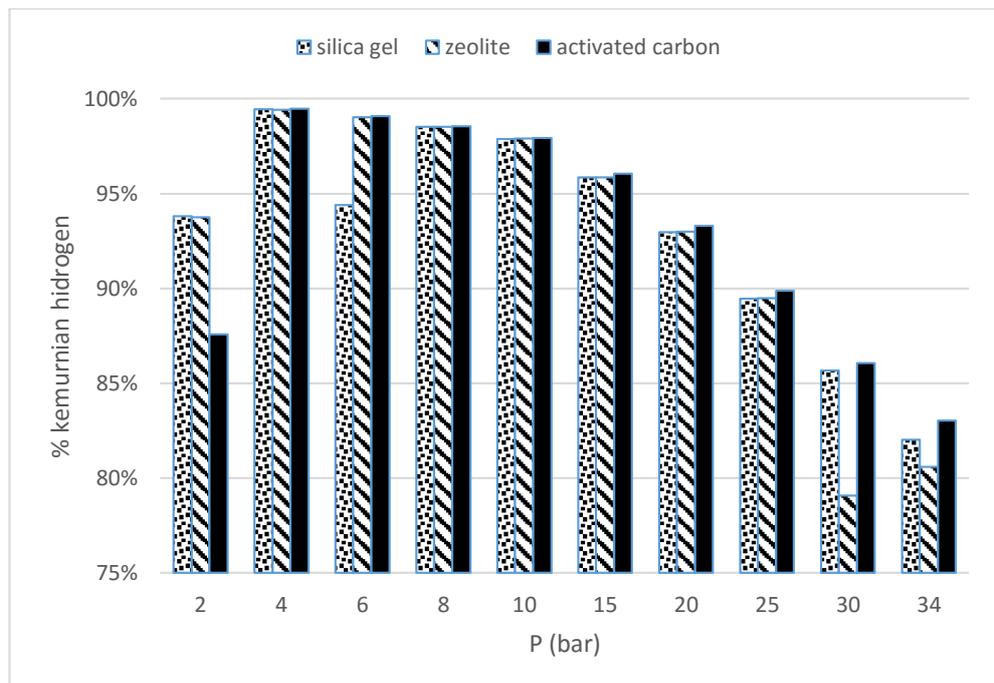
Kemurnian hidrogen yang telah disimulasikan menggunakan Aspen Adsorption berdasarkan perubahan tekanan dan adsorben pada Tabel 4.1. Adsorben karbon aktif pada tekanan 4 bar menghasilkan kemurnian hidrogen sebesar 99,49% menggunakan 2 bed. Sedangkan kemurnian hidrogen terbesar pada PSA 4 bed menggunakan adsorben activated carbon pada tekanan 4 bar yaitu 99,99%.

**Tabel 4.1 Kemurnian Hidrogen berdasarkan Tekanan dan Adsorben**

P (bar)	% Kemurnian Hidrogen							
	Silika gel		Zeolite		Karbon aktif		Molecular Sieve	
	2 bed	4 bed	2 bed	4 bed	2 bed	4 bed	2 bed	4 bed
2	93,80	98,80	95,12	99,96	87,58	98,48	98,27	99,91
4	99,46	99,99	99,78	99,95	99,49	99,99	99,41	99,99
6	94,40	99,89	99,78	99,97	99,08	99,98	99,01	99,97
8	98,51	99,94	99,76	99,94	98,55	99,90	98,77	99,96
10	97,89	99,90	99,72	99,90	97,94	99,90	98,49	99,94
15	95,85	99,71	95,87	99,71	96,05	99,71	97,88	99,90
20	92,98	99,34	93,01	99,34	93,30	99,35	95,85	99,71
25	89,46	98,69	89,50	98,69	89,89	98,72	92,98	99,37
30	85,68	96,62	79,08	96,80	86,08	97,71	89,46	98,73
34	82,02	96,38	80,58	96,15	83,04	96,60	85,68	97,70

Penggunaan adsorber 4 bed pada pemurnian hidrogen dapat meningkatkan kemurnian hidrogen jika dibandingkan dengan penggunaan 2 adsorber. Pemilihan adsorben karbon aktif yang dapat menyerap impurities terbanyak sehingga menghasilkan kemurnian hidrogen tertinggi pada PSA 2 bed. Jika menggunakan PSA 4 bed, maka adsorben yang dapat dipilih adalah silica gel, karbon aktif dan molecular sieve. Ketiga adsorben dapat menyerap impurities lebih banyak dibandingkan adsorben zeolite sehingga menghasilkan kemurnian hidrogen yang cukup tinggi yaitu 99,99%.

Optimisasi PSA (*Pressure Swing Adsorption*) untuk mendapatkan kemurnian hidrogen yang disimulasikan menggunakan software Aspen Adsorption dengan memperhatikan aspek kondisi operasi peralatan dan adsorben yang digunakan oleh PSA dalam penghematan energi dari utilitas luar yang sangat berhubungan erat dengan waktu dan biaya dalam menghasilkan produk. Optimisasi sistem PSA pada kondisi dinamik memiliki proses yang cukup rumit. Parameter yang digunakan dalam optimisasi PSA antara lain, tekanan, suhu, kecepatan gas, dan dimensi bed. Pada penelitian ini, parameter yang menjadi variabel proses antara lain tekanan dan jenis adsorben yang digunakan dalam proses adsorpsi pada PSA.



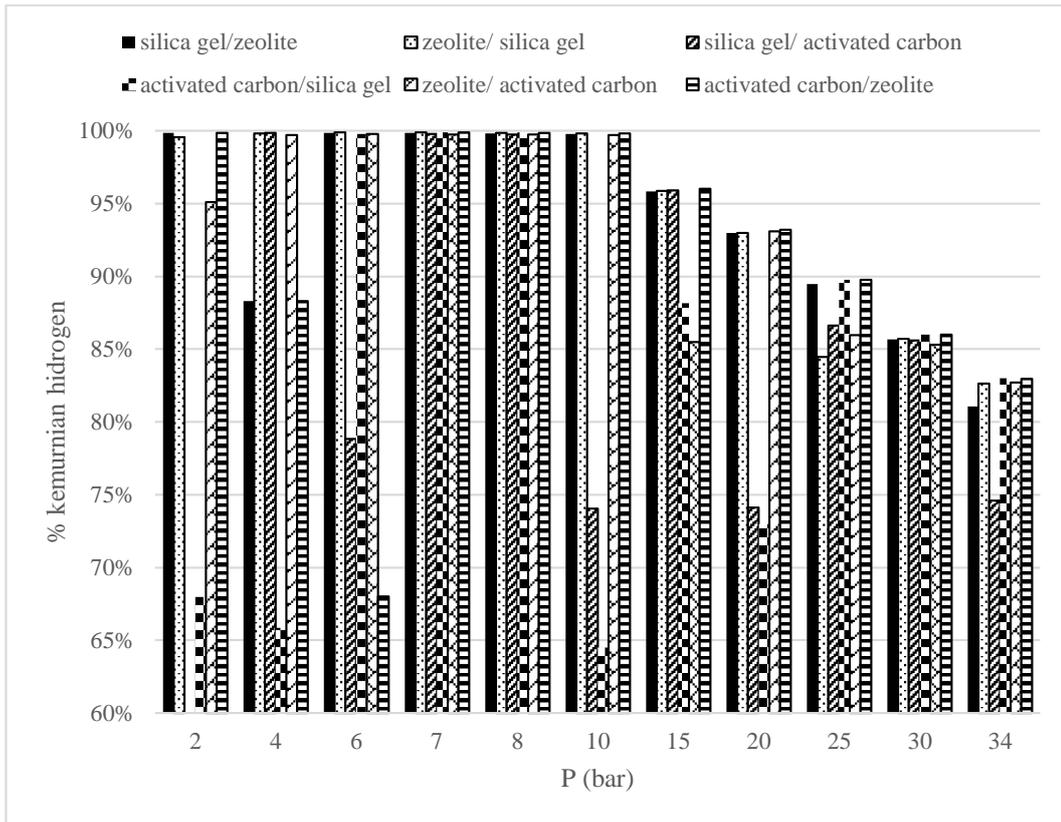
**Gambar 4.3 Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen Tanpa Variasi Adsorben**

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa terjadi perbedaan kemurnian hidrogen akibat adanya perbedaan tekanan disetiap adsorben. Hal ini berbeda jika menggunakan kombinasi adsorben yang berbeda pada tiap bed. Hasil simulasi pada perbedaan adsorben dapat dilihat pada Tabel 4.2

**Tabel 4.2 Kemurnian Hidrogen Berdasarkan Tekanan dan Kombinasi Adsorben**

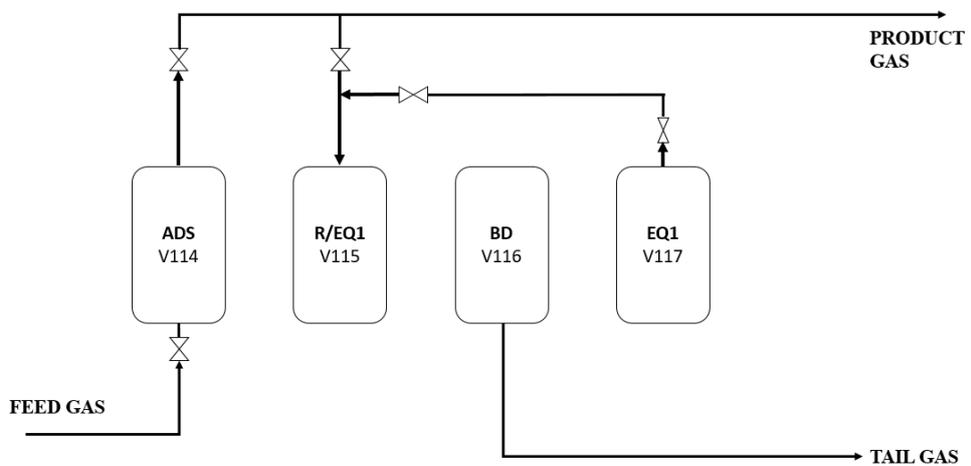
<b>P</b>	<b>Silica gel/ zeolite</b>	<b>Zeolite/ silica gel</b>	<b>Silica gel/ carbon active</b>	<b>Carbon active/ silica gel</b>	<b>Zeolite/ carbon active</b>	<b>Carbon active/ zeolite</b>
2	99,85%	99,58%		67,96%	95,12%	99,88%
4	88,31%	99,85%	99,86%	65,86%	99,74%	88,33%
6	99,89%	99,92%	78,82%	99,78%	99,81%	68,00%
7	99,86%	99,90%	99,78%	<b>99,92%</b>	99,77%	99,89%
8	99,85%	99,87%	99,76%	99,90%	99,76%	99,87%
10	99,81%	99,83%	74,04%	64,49%	99,72%	99,84%
15	95,85%	95,87%	95,90%	88,16%	85,48%	96,01%
20	92,98%	93,00%	74,12%	72,99%	93,09%	93,22%
25	89,47%	84,46%	86,63%	89,76%	85,96%	89,77%
30	85,68%	85,72%	85,60%	86,02%	85,32%	86,02%
34	81,07%	82,66%	74,60%	82,99%	82,72%	82,99%

Kemurnian hidrogen yang dihasilkan jika menggunakan kombinasi adsorben yang berbeda tiap bed lebih besar dibandingkan jika tanpa kombinasi adsorben tiap bed. Kemurnian hidrogen tertinggi terdapat pada kombinasi activated carbon dan silica gel dengan tekanan 7 bar. Adsorben activated carbon yang diletakkan pada bed 1 dan silica gel yang diletakkan pada bed 2 menghasilkan kemurnian hidrogen sebesar 99,92%. Pada Gambar 4.4 merupakan hasil simulasi pemurnian hidrogen yang ditampilkan dalam grafik.



**Gambar 4.4 Grafik Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan Variasi Adsorben**

Implementasi dalam proses pemurnian hidrogen menggunakan sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) yang disimulasikan dengan Aspen Adsorption dapat dilihat pada Lampiran 8 yang juga dimodelkan dengan blok pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5 Bagan *Pressure Swing Adsorption* dengan 4 Bed**

Pada simulasi tersebut diawali pada kondisi *dynamic*. Gas yang dipisahkan merupakan campuran dari metana, etana, propana, n-butana, i-butana, n-pentana, i-pentana, heksana, karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan hidrogen (H<sub>2</sub>) yang berasal dari Platforming FOC (Fuel Oil Complex) II dan Platforming KPC yang mengandung hydrogen terbanyak seperti pada Tabel 3.3. Data tersebut didapatkan dari Refinery Unit IV PT Pertamina Cilacap. Komposisi yang terdapat pada Tabel 3.3 tersebut diinputkan ke Aspen Adsorption. Pada Gambar 4.6 menunjukkan komposisi umpan yang diinput ke dalam Aspen Adsorption.

	Value	Units	Description
Y_spec(*)			
Y_spec("C1",1)	0,0239	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C2",1)	0,0266	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C3-1",1)	0,0188	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C4-1",1)	0,008	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C4H10-01",1)	0,0064	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C5H12-02",1)	0,0235	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C5H12-01",1)	0,0159	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("C6H14-01",1)	0,0024	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("CO",1)	0,0	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("CO2",1)	0,0	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("H2",1)	0,8744	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("H2O",1)	0,0	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
Y_spec("H2S",1)	0,0	kmol/kmol	Molefraction/composition specification
P_spec(*)			
P_spec(1)	34,0	bar	Pressure specification
T_spec(*)			
T_spec(1)	47,0	C	Temperature specification

**Gambar 4.6 Spesifikasi Umpan pada Aspen Adsorption**

Pada Gambar 4.7 menunjukkan kondisi adsorben yang digunakan pada bed adsorpsi. Spesifikasi adsorben yang diinput ke dalam Aspen Adsorption berdasarkan densitas adsorben. Data densitas adsorben dapat dilihat pada Lampiran 5. Fix bed adsorpsi yang digunakan dalam proses adsorpsi memiliki tipe vertikal. Pada simulasi Aspen Adsorption, jenis adsorben ditunjukkan berdasarkan ukuran, bentuk, diameter, densitas, dan porositas.

The image shows two side-by-side screenshots of the Aspen Adsorption software interface, specifically the 'Config\_AdsorbentProperty Table' for two different beds.

**Bed 1 Config\_AdsorbentProperty Table:**

	Value	Units	Spec
Layer(*)_Adsorben			
Layer(1)_Adsorbe	molecular sieve		
Layer(*)_rp			
Layer(1)_rp	0,00115	m	Fixed
Layer(*)_ei			
Layer(1)_ei	0,35	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed	Free
Layer(*)_ep			
Layer(1)_ep	0,61	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bead	Fixed
Layer(*)_et			
Layer(1)_et	0,4	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed	Free
Layer(*)_rhob			
Layer(1)_rhob	640,0	kg/m <sup>3</sup>	Fixed
Layer(*)_rhob			
Layer(1)_rhob	482,0	kg/m <sup>3</sup>	Fixed
Layer(*)_ap			
Layer(1)_ap	2608,7	1/m	Fixed

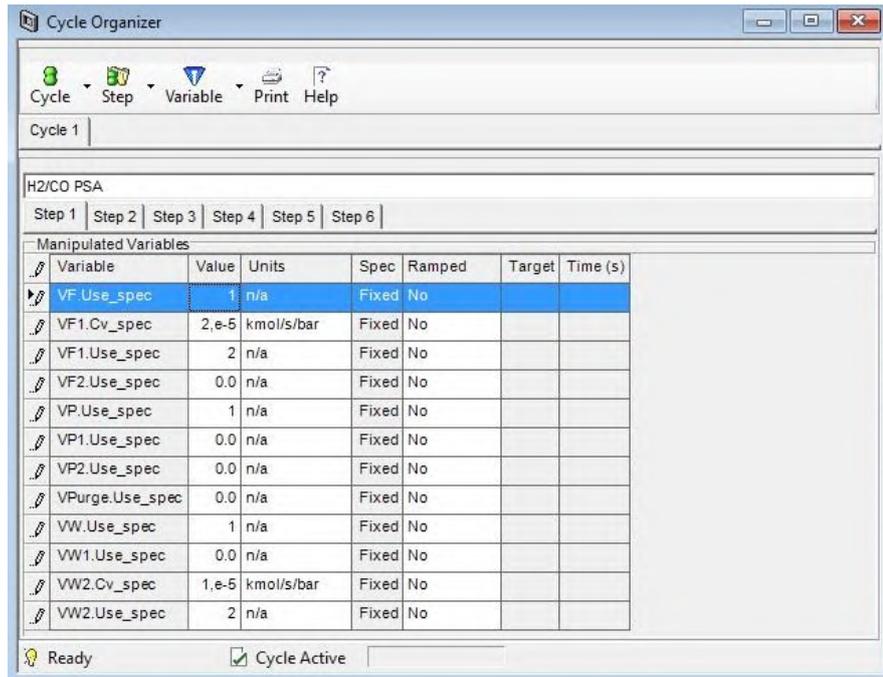
**Bed 2 Config\_AdsorbentProperty Table:**

	Value	Units	Spec	Description
Layer(*)_Adsorben				
Layer(1)_Adsorbe	molecular sieve			User description for adsorbent
Layer(*)_rp				
Layer(1)_rp	0,00115	m	Fixed	Particle radius
Layer(*)_ei				
Layer(1)_ei	0,35	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed	Free	Bed voidage (void fraction; eb)
Layer(*)_ep				
Layer(1)_ep	0,61	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bead	Fixed	Intraparticle voidage (particle porosity)
Layer(*)_et				
Layer(1)_et	0,4	m <sup>3</sup> void/m <sup>3</sup> bed	Free	Total voidage: et = ei + ep.(1 - ei)
Layer(*)_rhob				
Layer(1)_rhob	640,0	kg/m <sup>3</sup>	Fixed	Particle(=solid) density
Layer(*)_rhob				
Layer(1)_rhob	482,0	kg/m <sup>3</sup>	Fixed	Bed density: rhob = (1-ei).rhop
Layer(*)_ap				
Layer(1)_ap	2608,7	1/m	Fixed	Particle external surface area to particle volume ratio (=3/rp)

**Gambar 4.7 Spesifikasi Adsorben pada Aspen Adsorption**

Proses adsorpsi dalam larutan tergantung pada beberapa faktor, yaitu jenis adsorben (jika adsorbennya polar, maka komponen yang bersifat polar akan terikat lebih kuat dibandingkan dengan komponen yang kurang polar), jenis adsorbat, luas permukaan adsorben (tingkat adsorpsi naik dengan adanya penurunan ukuran partikel), konsentrasi zat terlarut (senyawa terlarut memiliki gaya tarik-menarik yang kuat terhadap pelarutnya sehingga lebih sulit diadsorpsi dibandingkan senyawa tidak larut), temperature (tingkat adsorpsi naik diikuti dengan kenaikan temperatur) (Atkins, 1990).

Proses PSA yang merupakan sistem batch yang memiliki siklus berkelanjutan sehingga dapat menggunakan *cycle organizer* pada Aspen Adsorption. Pada *cycle organizer*, PSA memiliki 6 step yaitu presurisasi, adsorpsi, *depressurizing pressure equilibration*, *blowdown*, *purging*, *prepressurizing pressure equilibrium*. Pada langkah pertama, bed 1 melakukan proses *pressurization* dengan umpan dan bed 2 melakukan proses *depressurization pressure* selama 30 detik dengan variabel yang ditentukan seperti pada Gambar 4.8.



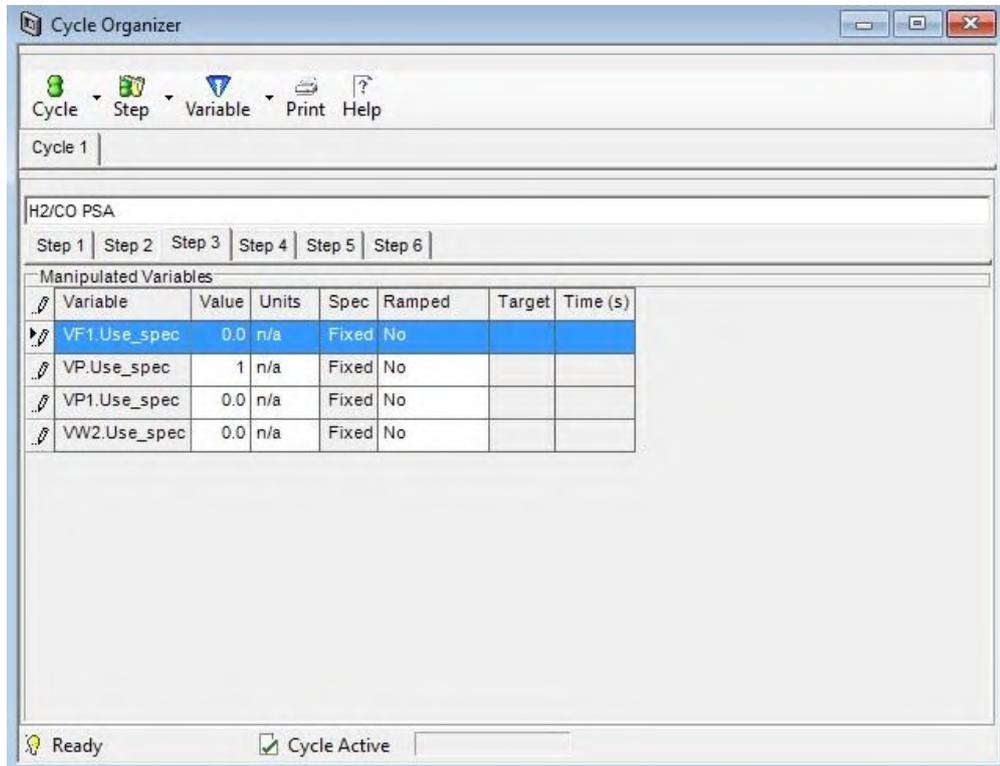
**Gambar 4.8 Variabel pada Step 1**

Selanjutnya langkah kedua yaitu proses bed 1 melakukan adsorpsi sedangkan bed melakukan proses purge selama 40 detik dengan variabel yang diunjukkan pada Gambar 4.9.



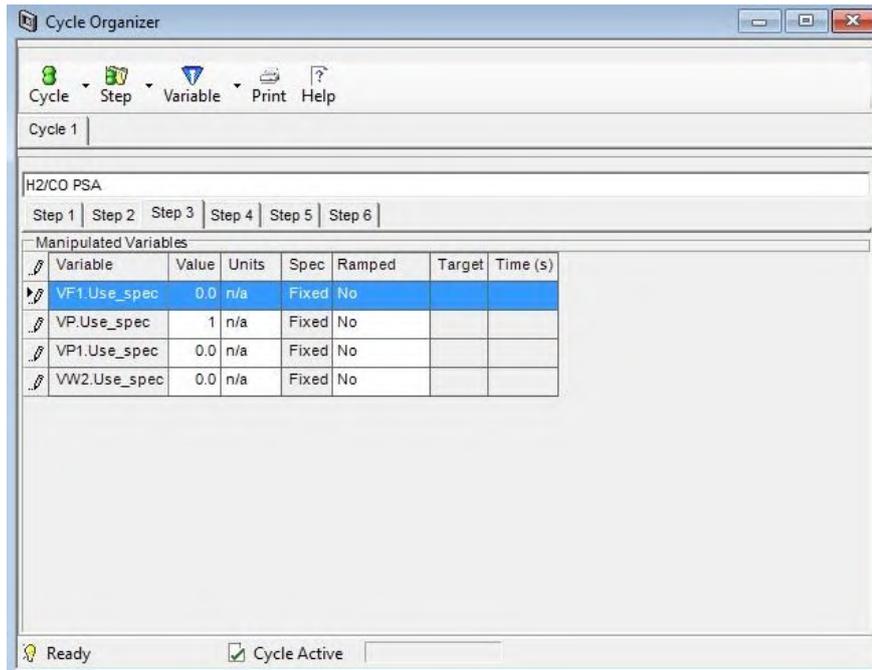
**Gambar 4.9 Variabel pada Step 2**

Selanjutnya langkah ketiga kedua bed menyamakan tekanan dalam proses *pressure equilibration* selama 160 detik dengan variabel yang diunjukkan pada Gambar 4.10.



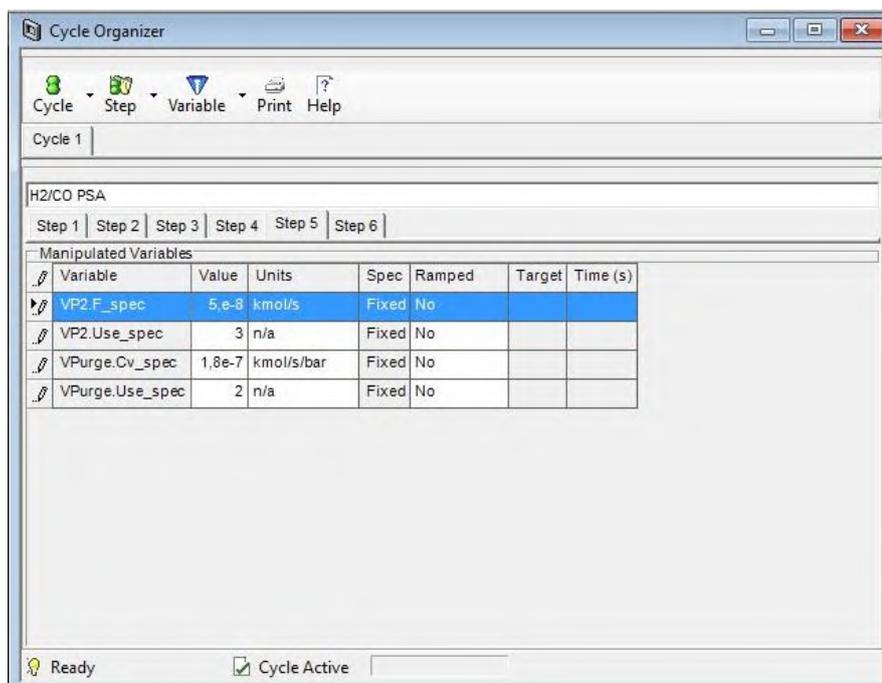
**Gambar 4.10 Variabel pada Step 3**

Selanjutnya langkah keempat, bed 1 melakukan proses penurunan tekanan sedangkan bed 2 melakukan proses presurisasi selama 30 detik dengan variabel yang diunjukkan pada Gambar 4.11.



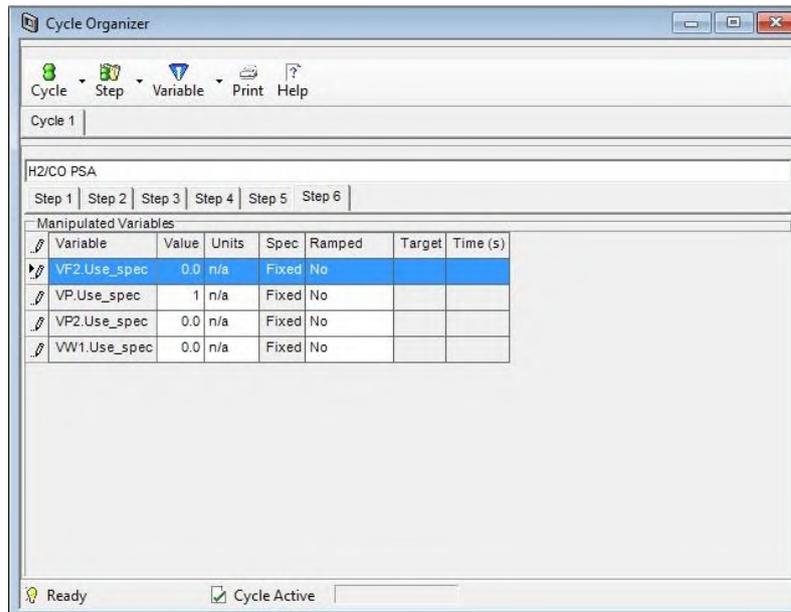
**Gambar 4.11 Variabel pada Step 4**

Bed 1 yang telah diturunkan tekanannya kemudian adsorben diregenerasi padaa proses purge sedangkan bed 2 melakukan adsorpsi. Kedua bed tersebut berjalan selama 40 detik dengan variabel yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.12 Variabel pada Step 5**

Gambar 4.13 yang merupakan variabel pada langkah keenam pada proses penyamaan tekanan untuk ke dua bed adsorpsi.



**Gambar 4.13 Variabel pada Step 6**

Pada langkah keenam pada proses penyamaan tekanan untuk ke dua bed adsorpsi yang berlangsung selama 140 detik. Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk proses pemurnian hidrogen dengan PSA menggunakan 2 bed sekitar 420 detik. Cycle organizer yang diatur sehingga terjadi 10 siklus sehingga membutuhkan waktu 4200 detik. Setelah melakukan enam step pada dua bed yang bekerja secara paralel didapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.14.

	Value	Units	Spec	Description
F(*)				
F(0)	2,68841e-020	kmol/hr	Free	Stream molar flowrate
Y(*)				
Y("C1",0)	3,3691e-004	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C2",0)	0,0311324	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C3-1",0)	0,0222232	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C4-1",0)	0,00988755	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C4H10-01",0)	0,00806014	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C5H12-02",0)	0,0275915	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C5H12-01",0)	0,0189108	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("C6H14-01",0)	0,00349173	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("CO",0)	9,3314e-007	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("CO2",0)	-1,19828e-008	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("H2",0)	0,876882	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("H2O",0)	7,41603e-004	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
Y("H2S",0)	7,41603e-004	kmol/kmol	Free	Stream molefraction composition
P(*)				
P(0)	1,013	bar	Free	Stream pressure
T(*)				
T(0)	298,15	K	Free	Stream temperature
H(*)				
H(0)	-0,0150904	GJ/kmol	Free	Stream enthalpy

**Gambar 4.14 Hasil Simulasi PSA pada Aspen Adsorption**

Penggunaan PSA 2 bed pada simulasi Aspen Adsorption yang menggunakan data dari PT Pertamina Cilacap menghasilkan kemurnian hidrogen sebesar 87,68%. Kemurnian hidrogen tersebut didapat pada tekanan 34 bar dengan adsorben *molecular sieve*. Sedangkan untuk kemurnian hidrogen berdasarkan pengaruh tekanan juga disimulasikan pada studi ini. Hasil simulasi Aspen Adsorption dalam memurnikan hidrogen dengan data PT Pertamina Cilacap terdapat pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3 Hasil Simulasi Pemurnian Hidrogen dengan Existing Condition**

P (bar)	Kemurnian H <sub>2</sub>		
	2 bed	4 bed	actual
8	87,92 %	86,47%	
15	87,80 %	86,09%	
20	87,50 %	85,88%	
25	87,57 %	85,80%	
30	87,71 %	85,77%	
34	87,69 %	85,98%	99,5%

Berdasarkan hasil simulasi PSA dengan 2 bed untuk memurnikan hidrogen menggunakan data dari PT Pertamina Cilacap menghasilkan 87,92%. Selain itu kemurnian hidrogen yang didapat menggunakan PSA 4 bed menunjukkan hasil yang perlu dikaji ulang pada penelitian selanjutnya. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan mengikuti penelitian Yang and Lee (1997) seperti pada Tabel 4.3 menghasilkan kemurnian yang jauh lebih dibandingkan dengan data existing condition dari PT Pertamina Cilacap. Parameter penting dalam menjalankan simulasi dengan menghitung sizing dari adsorben dan parameter yang digunakan dalam Aspen Adsorption. Beberapa parameter tersebut yang tidak didapatkan dari PT Pertamina Cilacap.

Perubahan komposisi hidrogen yang tidak terlalu tinggi dapat disebabkan karena kondisi operasi yang berbeda dengan kondisi asli yang disimulasikan pada PT Pertamina begitu pula jumlah bed yang berbeda. PSA merupakan cara paling sering digunakan dalam memurnikan hidrogen sehingga dikembangkan menjadi proses multi-bed dengan kombinasi adsorben yang berbeda tiap kolom pada langkah *pressure equalization* (Lopez dkk, 2011).

Pada PT Pertamina yang menggunakan 4 bed untuk pemurnian hidrogen dengan unit PSA menghasilkan kemurnian yang cukup tinggi yaitu 99,5%. Pada penelitian ini juga melihat pengaruh perbedaan adsorben yang digunakan dalam memurnikan hidrogen. Pemurnian hidrogen menggunakan proses PSA dengan utilitas yang berbeda akan mengubah kapasitas adsorben pada tekanan yang berbeda untuk memisahkan campuran gas menjadi komponen yang diinginkan. Hal tersebut dikarenakan setiap komponen pada campuran gas memiliki tekanan dan adsorben yang berbeda dalam pemisahan dari campuran gas.

Jika produk akhir dari adsorpsi tidak terkontaminasi selama proses adsorpsi dan *depressurizing pressure equalization*, maka proses regenerasi adsorben akan menghasilkan kemurnian tinggi dan *recovery* rendah. Pada langkah penyamaan tekanan menghasilkan kinerja yang terbaik untuk sistem PSA. Ketika fraksi hidrogen pada aliran buangan selama penyamaan tekanan tidak tinggi, maka kemurnian hidrogen pada adsorpsi mula-mula akan terkontaminasi dengan produk akhir.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Perbandingan Metode Purification

Comparison of Hydrogen Purification Technique						
Technique	Principle	Typical Feed Gas	Hydrogen output percent		Scale of use	comments
			purity	recovery		
cryogenic	Partial condensation of gas mixtures at low temperatures	Petrochemical and refinery off-gases	90-98	95	Large scale	Prapurification step necessary to remove CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S and water
Polymer Membrane Diffusion	Differential rate of diffusion of gases through a permeable membrane	Refinery off-gases and ammonia purge gas	92-98	>85	Small to large	He, CO <sub>2</sub> , and H <sub>2</sub> O may also permeate the membrane
Metal Hydride Separation	Reversible reaction of hydrogen with metals from hydrides	Ammonia purge gas	99	75-95	Small to medium	Hydrogen absorption poisoned by O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CO, and S
Solid Polymer Electrolyte Cell	Electrolytic passage of hydrogen ions across a solid polymer membrane	Purification of hydrogen produced by thermochemical cycles	99,8	95	small	Sulphur-containing compounds poison the electrocatalysts
Pressure swing adsorption	Selective adsorption of impurities from gas stream	Any hydrogen rich gas	99,999	70-85	large	The recovery is relatively low as hydrogen is lost in

						purging step
Catalytic purification	Removal of oxygen by catalytic reaction with hydrogen	Hydrogen streams With oxygen impurity	99.999	Up to 99	Small to large	Usually used to upgrade electrolytic hydrogen. Organics Pb-, Hg-, Cd-, and S-compounds poison the catalytic H <sub>2</sub> O produced
Palladium Membrane Diffusion	Selective diffusion of hydrogen through a palladium alloy membrane	Any hydrogen containing gas streams	>99,999	Up to 99	Small to medium	Sulphur-containing compounds and saturated hydrogen impair permeability

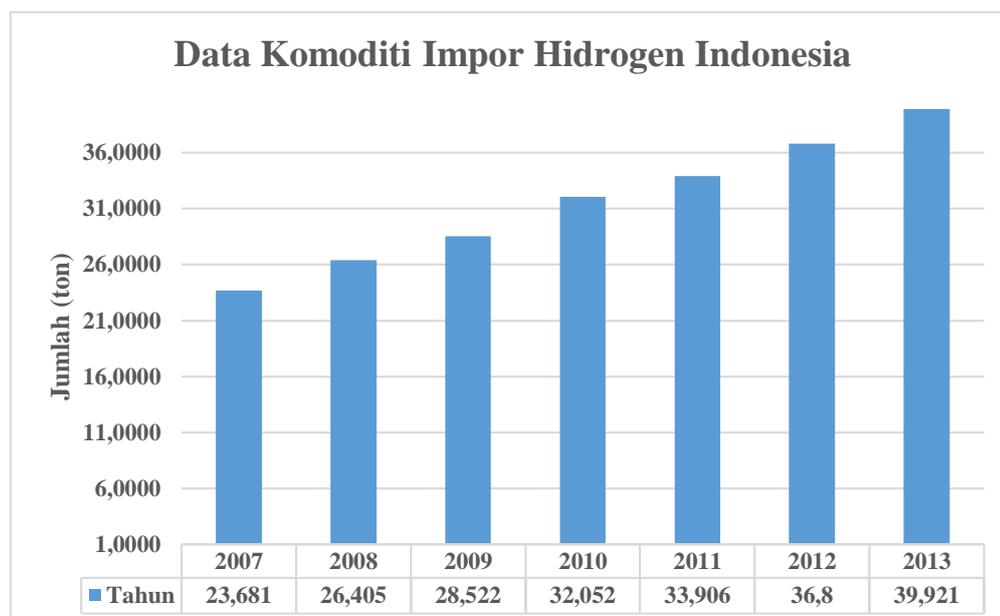
(Itsuki Uehara, 2005)

**Lampiran 2. Kestimbangan dan Parameter Neraca Massa untuk CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> pada karbon aktif dan zeolite 5A**

Adsorbent	Sorbate	$q_s$ (mmol/g)	$b_{1,i}$ (cm <sup>3</sup> /mmol)	$b_{2,i}$ (1/K)	Henry's constant at 303 K	Mass-transfer coefficient ( $k$ ), measured at 298 K (1/s)
Activated carbon	CO <sub>2</sub>	6.77	$1.59 \times 10^{-2}$	-0.0295	93.4	0.125
	CO		$1.14 \times 10^{-4}$	-0.0195	11.0	0.334
	H <sub>2</sub>		$2.27 \times 10^{-6}$	-0.0131	1.3	1.0
	CH <sub>4</sub>		$2.62 \times 10^{-4}$	-0.0205	38.5	0.415
Zeolite 5A	CO <sub>2</sub>	3.82	52.60	-0.0457	1248.1	0.053
	CO		$4.51 \times 10^{-4}$	-0.0214	24.1	0.145
	H <sub>2</sub>		$9.60 \times 10^{-6}$	-0.0183	0.9	1.0
	CH <sub>4</sub>		$1.80 \times 10^{-4}$	-0.0196	17.3	0.212

(Ralph T. Yang, 1986)

### Lampiran 3. Data Komoditi Impor Hidrogen Indonesia



(Badan Pusat Statistik Indonesia, 2014)

### Lampiran 4. Macam-Macam Proses Produksi Hidrogen

Bahan Baku	Proses	Presentase Penggunaan	Cost H <sub>2</sub>
Gas alam/ gas metan batubara (CBM)	<i>Steam Reforming</i> <i>Autothermal Reforming</i> <i>Catalytic Partial Oxidation</i>	48%	6,26 (\$/GJ)
Minyak Bumi	<i>Non-Catalytic Partial Oxidation</i> <i>Catalytic Reforming</i>	30%	9,83 (\$/GJ)
Batubara	<i>Gasification</i>	18%	11,57 (\$/GJ)
Biomassa	<i>Gasification</i>		8,69 (\$/GJ)
Air	<i>Electrolysis</i> <i>Photovoltaic</i>	4%	20,6 (\$/GJ)
Alkohol	<i>Steam Reforming</i>		

(Development of Energy, 2013)

## Lampiran 5. Spesifikasi Adsorben

**TABLE 16-5 Physical Properties of Adsorbents**

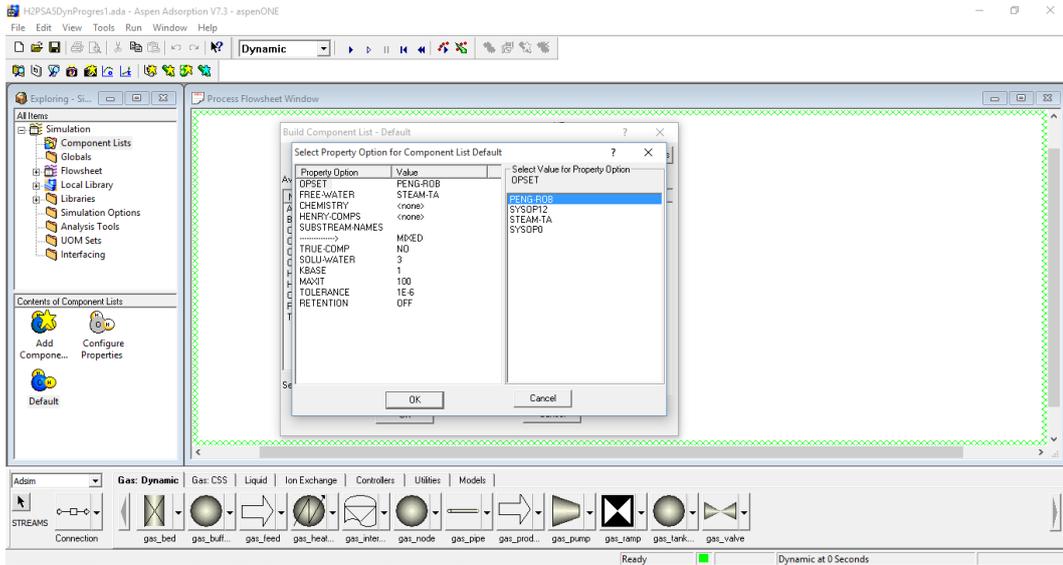
Material and uses	Shape* of particles	Size range, U.S. standard mesh†	Internal porosity, %	Bulk dry density, kg/L	Average pore diameter, nm	Surface area, km <sup>2</sup> /kg	Sorptive capacity, kg/kg (dry)
<b>Aluminas</b>							
Low-porosity (fluoride sorbent)	G, S	8-14, etc.	40	0.70	-7	0.32	0.20
High-porosity (drying, separations)	G	Various	57	0.85	4-14	0.25-0.36	0.25-0.33
Desiccant, CaCl <sub>2</sub> -coated	G	3-8, etc.	30	0.91	4.5	0.2	0.22
Activated bauxite	G	8-20, etc.	35	0.85	5		0.1-0.2
Chromatographic alumina	G, P, S	80-200, etc.	30	0.93			-0.14
<b>Silicates and aluminosilicates</b>							
<b>Molecular sieves</b>	S, C, P	Various					
Type 3A (dehydration)			-30	0.62-0.68	0.3	-0.7	0.21-0.23
Type 4A (dehydration)			-32	0.61-0.67	0.4	-0.7	0.22-0.26
Type 5A (separations)			-34	0.60-0.66	0.5	-0.7	0.23-0.28
Type 13X (purification)			-38	0.58-0.64	1.0	-0.6	0.25-0.36
Silicalite (hydrocarbons)	S, C, P	Various		0.64-0.70	0.6	-0.4	0.12-0.16
Dealuminated Y (hydrocarbons)	S, C, P	Various		0.48-0.53	0.8	0.5-0.8	0.28-0.42
Mordenite (acid drying)				0.88	0.3-0.8		0.12
Chabazite (acid drying)				0.72	0.4-0.5		0.20
Silica gel (drying, separations)	G, P	Various	38-48	0.70-0.82		0.6-0.8	0.35-0.50
Magnesium silicate (decolorizing)	G, P	Various	-33	-0.50	2-5	0.18-0.30	
Calcium silicate (fatty-acid removal)	P		75-80	-0.20		-0.1	
Clay, acid-treated (refining of petroleum, food products)	G	4-8		0.85			
Fuller's earth (same)	G, P	<200		0.80			
Diatomaceous earth	G	Various		0.44-0.50		-0.002	
<b>Carbons</b>							
Shell-based	G	Various	60	0.45-0.55	2	0.8-1.6	0.40
Wood-based	G	Various	-80	0.25-0.30		0.8-1.8	-0.70
Petroleum-based	G, C	Various	-80	0.45-0.55	2	0.9-1.3	0.3-0.4
Peat-based	G, C, P	Various	-55	0.30-0.50	1-4	0.8-1.6	0.5
Lignite-based	G, P	Various	70-85	0.40-0.70	3	0.4-0.7	0.3
Bituminous-coal-based	G, P	8-30, 12-40	60-80	0.40-0.60	2-4	0.9-1.2	0.4
Synthetic polymer based (pyrolyzed)	S	20-100	40-70	0.49-0.60		0.1-1.1	
Carbon molecular sieve (air separation)		Various	35-50	0.5-0.7	0.3-0.6		0.5-0.20
<b>Organic polymers</b>							
Polystyrene (removal of organics, e.g., phenol; antibiotics recovery)	S	20-60	40-60	0.64	4-20	0.3-0.7	
Polyacrylic ester (purification of pulping wastewaters; antibiotics recovery)	G, S	20-60	50-55	0.65-0.70	10-25	0.15-0.4	
Phenolic (also phenolic amine) resin (decolorizing and deodorizing of solutions)	G	16-50	45	0.42		0.08-0.12	0.45-0.55

\*Shapes: C, cylindrical pellets; F, fibrous flakes; G, granules; P, powder; S, spheres.

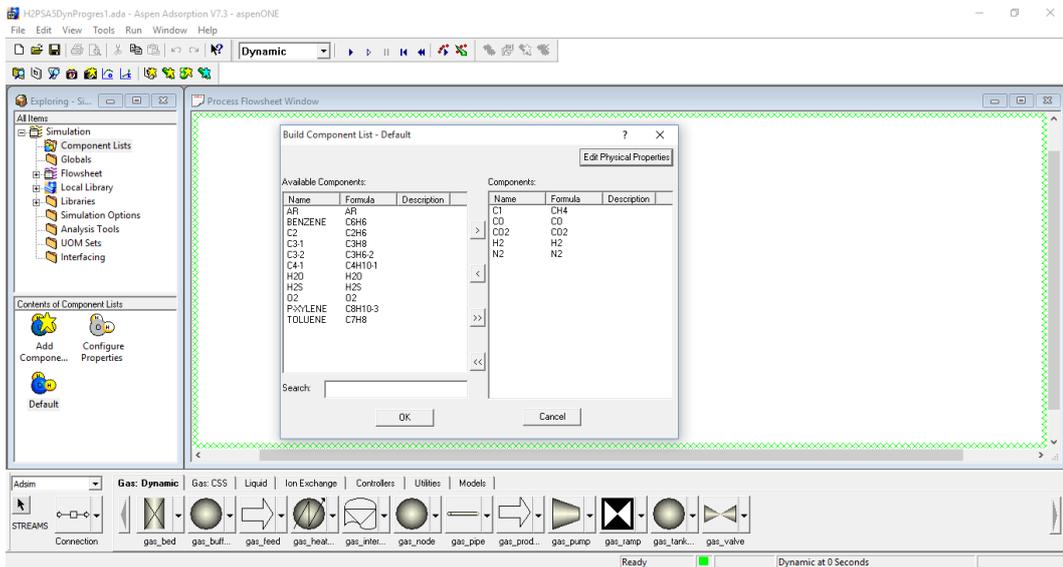
†U.S. Standard sieve sizes (given in parentheses) correspond to the following diameters in millimeters: (3) 6.73, (4) 4.76, (8) 2.98, (12) 1.68, (14) 1.41, (16) 1.19, (20) 0.841, (30) 0.595, (40) 0.420, (50) 0.297, (60) 0.250, (80) 0.177, (200) 0.074.

(Perry, 1984)

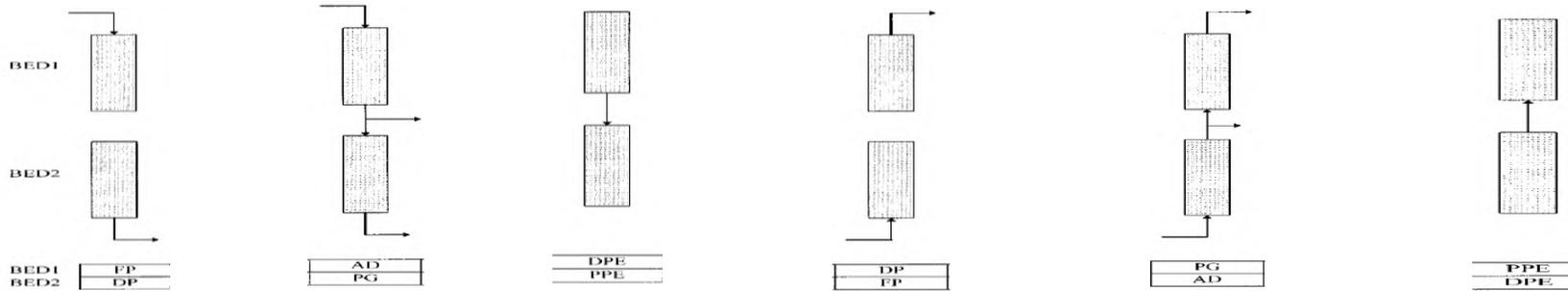
## Lampiran 6. Kondisi Operasi Sistem PSA pada Aspen Properties



## Lampiran 7. Komponen Feed Sistem PSA pada Aspen Properties

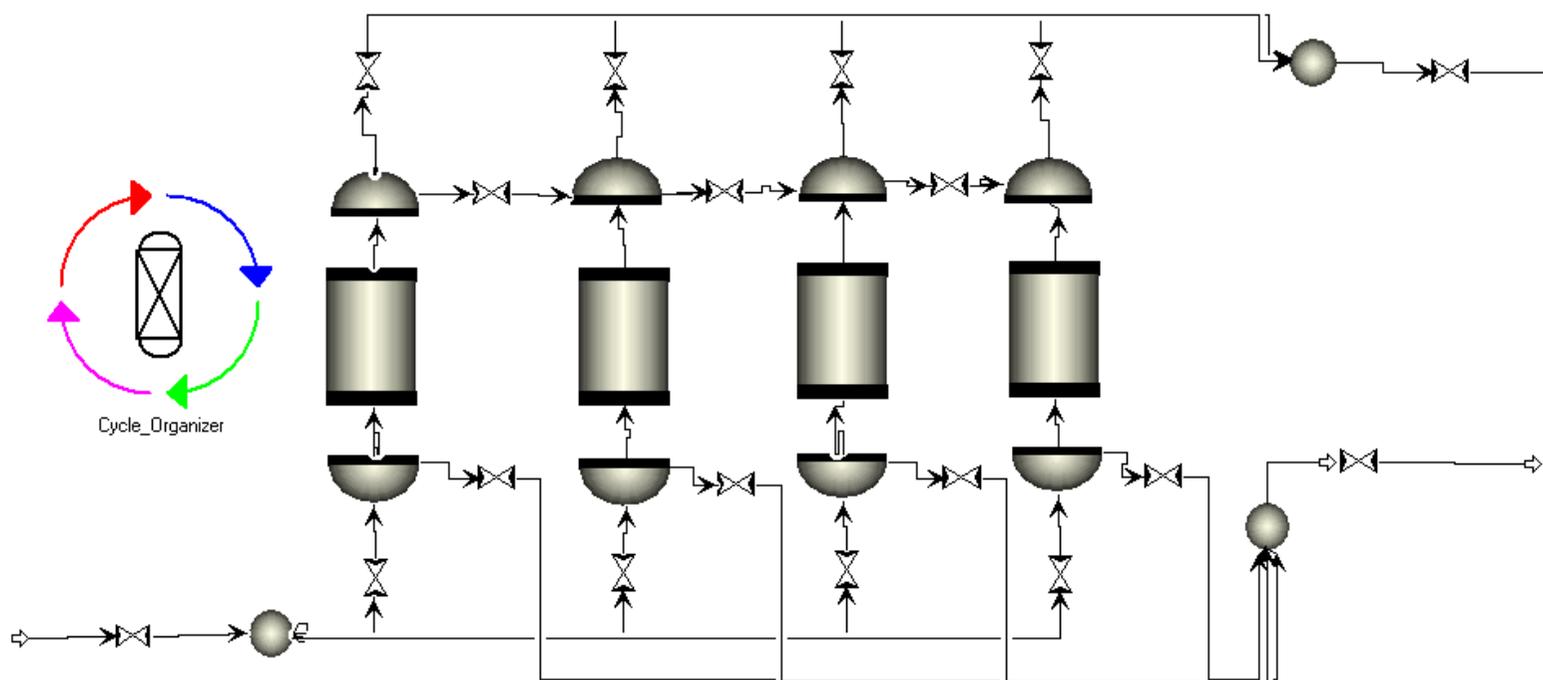


### Lampiran 8. Cycle Sequence 2 Beds PSA pada Aspen Adsorption



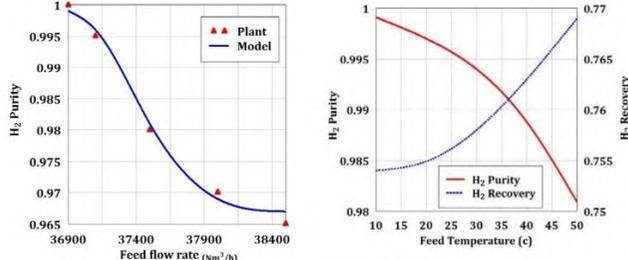
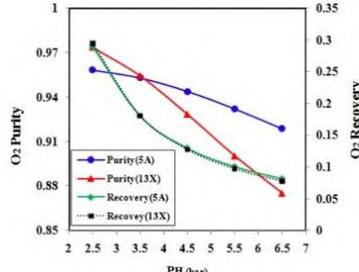
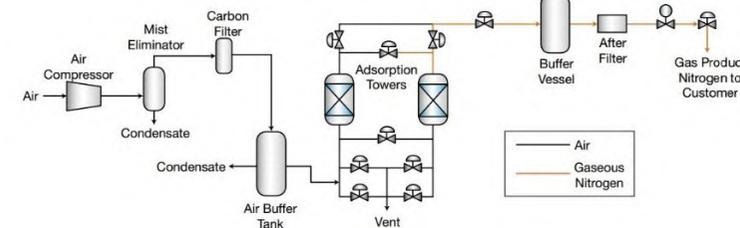
Cycle Organizer	Cycle Organizer	Cycle Organizer	Cycle Organizer	Cycle Organizer	Cycle Organizer
<p>Control</p> <p>Description Pressurization Bed1, Depressurization Bed2</p> <p>Time driven: 30 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>	<p>Control</p> <p>Description Adsorption Bed1, Purge Bed2</p> <p>Time driven: 40 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>	<p>Control</p> <p>Description Pressure Equilibration</p> <p>Time driven: 160 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>	<p>Control</p> <p>Description Depressurization Bed1, Pressurization Bed2</p> <p>Time driven: 30 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>	<p>Control</p> <p>Description Purge Bed 1, Adsorption Bed2</p> <p>Time driven: 40 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>	<p>Control</p> <p>Description Pressure Equilibration</p> <p>Time driven: 160 s</p> <p>Event driven: Value, Variable, Expression</p> <p>Other: Step dependent: None</p> <p>Cyclic Steady-State: Time nodes: 5</p> <p>Ready <input checked="" type="checkbox"/> Cycle Active</p>

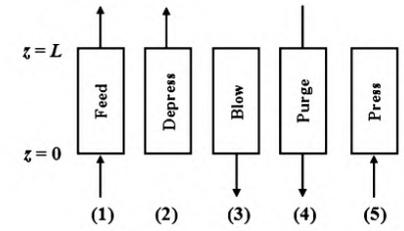
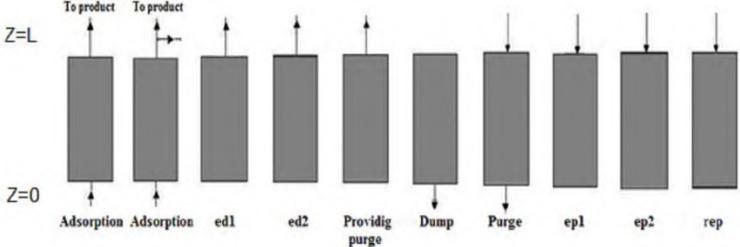
Lampiran 9. *Pressure Swing Adsorption* dengan 4 Bed Adsorber menggunakan Simulasi Aspen Adsorption

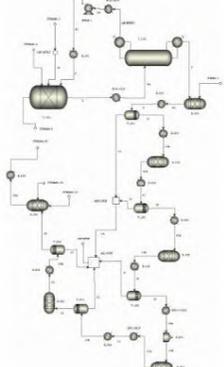
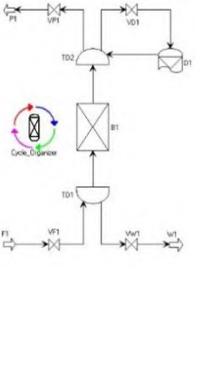
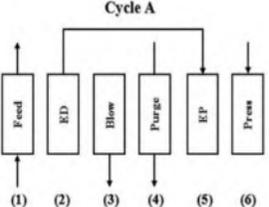
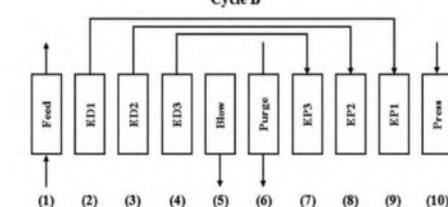


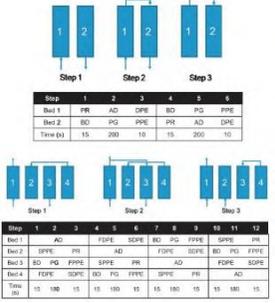
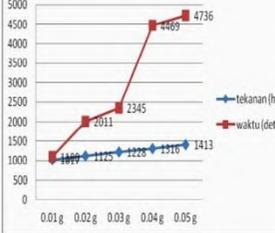
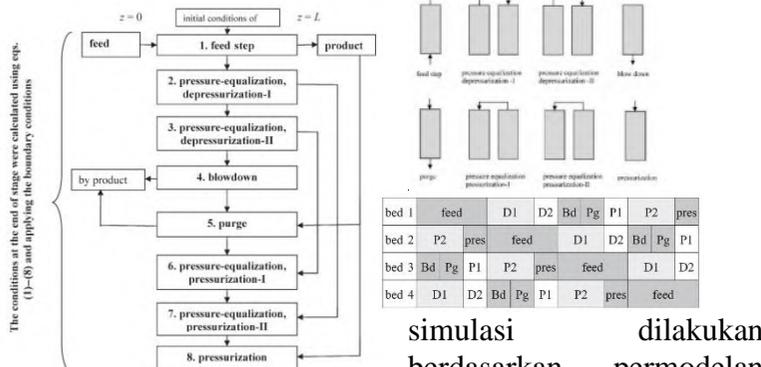
Lampiran 9. Tabel Penelitian Terdahulu Pemurnian Hidrogen menggunakan Sistem Pressure Swing Adsorption

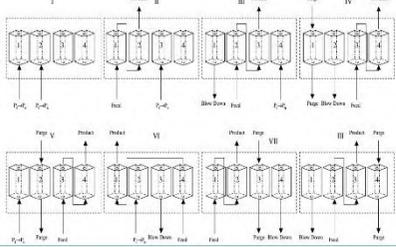
Tahun	Peneliti	Judul Penelitian	Tujuan	Adsorben	Hasil dan Pembahasan																																								
2014	Sadighi S., Asgari M., Anisi H., dan Moham madi H.,	Designing a Commercial Scale PSA for H <sub>2</sub> Purification	Merancang PSA dalam memurnikan H <sub>2</sub> menggunakan 5A molecular sieve untuk skala industri	5A molecular sieve	<p>Permodelan matematika yang data-datanya dalam skala lab menggunakan Quantochrome Analyzer kemudian divalidasi dengan software Aspen Adsorption.</p>																																								
2014	Joakim Henrik Beck	Efficient Targeted Optimisation for the Design of Pressure Swing Adsorption Systems for CO <sub>2</sub> Capture in Power Plants	Merancang PSA dalam proses penangkapan CO <sub>2</sub> dengan simulasi numerik	Zeolite 13X	<table border="1"> <caption>Purity (%) Recovery (%) SORT (descending)</caption> <thead> <tr> <th>Purity (%)</th> <th>Recovery (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17.2</td><td>68.8</td></tr> <tr><td>20.3</td><td>99.9</td></tr> <tr><td>19.0</td><td>64.0</td></tr> <tr><td>32.1</td><td>67.0</td></tr> <tr><td>18.8</td><td>51.1</td></tr> <tr><td>5.8</td><td>99.9</td></tr> <tr><td>28.9</td><td>92.8</td></tr> <tr><td>34.9</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>28.2</td><td>42.1</td></tr> <tr><td>17.3</td><td>75.2</td></tr> <tr><td>28.9</td><td>92.8</td></tr> <tr><td>20.3</td><td>99.9</td></tr> <tr><td>5.8</td><td>99.9</td></tr> <tr><td>32.1</td><td>67.0</td></tr> <tr><td>18.8</td><td>51.1</td></tr> <tr><td>17.2</td><td>68.8</td></tr> <tr><td>19.0</td><td>64.0</td></tr> <tr><td>18.8</td><td>51.1</td></tr> <tr><td>34.9</td><td>18.5</td></tr> </tbody> </table> <p>A single design solution (34.9 % Purity, 18.5 % Recovery)</p> <p>Permodelan matematik dari sistem PSA dalam penangkapan CO<sub>2</sub> berdasarkan model surrogate dan model Kriging</p>	Purity (%)	Recovery (%)	17.2	68.8	20.3	99.9	19.0	64.0	32.1	67.0	18.8	51.1	5.8	99.9	28.9	92.8	34.9	18.5	28.2	42.1	17.3	75.2	28.9	92.8	20.3	99.9	5.8	99.9	32.1	67.0	18.8	51.1	17.2	68.8	19.0	64.0	18.8	51.1	34.9	18.5
Purity (%)	Recovery (%)																																												
17.2	68.8																																												
20.3	99.9																																												
19.0	64.0																																												
32.1	67.0																																												
18.8	51.1																																												
5.8	99.9																																												
28.9	92.8																																												
34.9	18.5																																												
28.2	42.1																																												
17.3	75.2																																												
28.9	92.8																																												
20.3	99.9																																												
5.8	99.9																																												
32.1	67.0																																												
18.8	51.1																																												
17.2	68.8																																												
19.0	64.0																																												
18.8	51.1																																												
34.9	18.5																																												

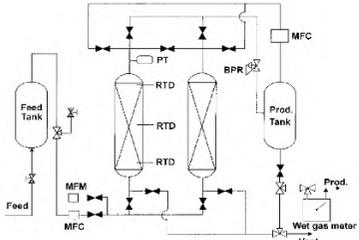
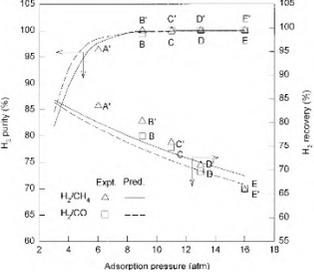
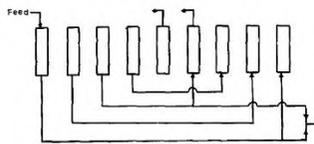
2014	Javadi, S E., Farniaei M., dan Shahcher aghi M.,	Numerical Simulation of H <sub>2</sub> -PSA	Mempelajari penurunan numerik PSA dengan model matematika dan simulasi numerik	Zeolite	 <p>PDE diselesaikan dengan Metode Rung-Kutta untuk melihat efek suhu umpan pada pemurnian dan recovery hidrogen sebagai variabel operasi.</p>
2013	Javadi dan Masoud	Comparison of Two Pressure Swing Adsorption Processes for Air Separation Using Zeolite 5A and Zeolite 13X	Membandingkan dua adsorben dalam memisahkan oksigen dari udara berdasarkan model matematika	Zeolite 5A dan <b>Zeolite 13X</b>	 <p>Mempelajari efek laju alir umpan, tekanan dan waktu pada langkah Adsorpsi, dan perbandingan <i>purge to feed</i> dalam pemurnian dan <i>recovery</i> oksigen.</p>
2012	Ivanova dan Lewis	Producing Nitrogen via Pressure Swing Adsorption	Mengetahui range nitrogen yang dihasilkan dengan menggunakan PSA	Carbon Molecular Sieves (CMS)	 <p>PSA dapat menjadi metode alternatif untuk mendapatkan biaya efektif dalam menghasilkan nitrogen dengan range kemurnian yang cukup luas.</p>

2012	Lopes, F V.S., Grande, C A., dan Rodrigues A E.,	Fast-cycling VPSA for hydrogen purification	Menentukan efek kinetika dari komponen biner menjadi batas proses PSA	Karbon aktif	<p style="text-align: center;"><b>RVPSA Cycle</b></p>  <p>Beberapa simulasi digunakan untuk menentukan efek dari variabel proses yang ditunjukkan berdasarkan permodelan matematika. Proses yang berlangsung antara lain tahap co-current umpan, tahap co-current depresurisasi, countercurrent blowdoan, countercurrent purge dengan hidrogen dan co-current presurisasi dengan umpan.</p>
2011	Elbrahim, M A., Arsalan M R G., Fatemi, S.,	Modeling and Simulation of an Industrial Hydrogen Purification Unit in Pressure Swing Adsorption Process	Mengembangkan proses PSA dengan dua lapis kolom dalam pemurnian hidrogen dari produk steam reforming metana	Karbon aktif dan zeolite 5A	 <p>Tediri dari 9 langkah yaitu adsorpsi, dua tahap ekualisasi pada mode desorpsi, purge, dump, purge, dua tahap ekualisasi pada adsorpsi dan represurisasi dengan produk. Perancangan berdasarkan simulasi MATLAB.</p>

2011	Zargaran J., dan Bahmani M.,	Simulation of Separation of Valuable Components from Flare Stack Gases	Merancang proses untuk mendapatkan hasil gas yang keluar dari flare stack	Zeolite 5X	 	Merancang proses pemisahan gas hidrogen dari hidrogen sulfida yang berasal dari flare stack menggunakan simulasi Aspen Plus dan Aspen Adsim
2011	Lopes, F V.S., Grande, C A., dan Rodrigues, A E.,	Activated Carbon for H <sub>2</sub> Purification by PSA	melihat respon PSA untuk pemisahan multi komponen	Activated Carbon	  <p>Percobaan sepuluh langkah VPSA divalidasi dengan permodelan matematika. Siklus yang terdiri dari pengkompresan tekanan dengan umpan, tiga depresurisasi, blowdown, purge, tiga penyesuaian tekanan, dan presurisasi.</p>	

<p>2011</p>	<p>Sol, A., Geun, L. D., You, Y. W., Hyun, K. K., Min, O., dan Ha, L. C.,</p>	<p>Layered two- and four- bed PSA Process for H<sub>2</sub> Recovery from Coal Gas</p>	<p>membandingkan proses PSA dua bed dan 4 bed</p>	<p>Zeolite 5A dan Activated Carbon</p>		<p>Variabel operasi (kemurnian dan recovery) lebih signifikan pada proses PSA 2 bed dibandingkan PSA 4 bed. Pengembangan 2 atau 4 bed PSA untuk pemisahan dari pengotor. Lapisan zeolite pada 2 bed PSA lebih cocok untuk pemisahan nitrogen, sedangkan PSA 4 bed digunakan untuk pemurnian.</p>
<p>2010</p>	<p>Siregar, Y D I,</p>	<p>Produksi Gas Hidrogen dari Limbah Aluminium</p>	<p>memanfaatkan limbah alumunium yang belum termafaatkan secara optimal menjadi gas hidrogen yang dibutuhkan sebagai sumber fuel cell, sumber energi yang ramah lingkungan</p>	<p>Katalis (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH, KOH dan NaCl)</p>		<p>Meningkatnya (<math>\Delta P</math>), maka menunjukkan meningkatnya produksi hidrogen. Selanjutnya produksi hidrogen dapat ditunjukkan oleh tekanan</p>
<p>2010</p>	<p>Biswas P., Agrawal S., dan Sinha S.,</p>	<p>Modeling and Simulation for Pressure Swing Adsorption System for Hydrogen Purification</p>	<p>Memodelkan dan mensimulasikan siklus PSA untuk pemurnian hidrogen berdasarkan sistem yang terdiri 4 bed dan 8 langkah.</p>	<p>Karbon Aktif dan zeolite</p>	 <p>The conditions at the end of stage were calculated using eqs. (1)-(6) and applying the boundary conditions</p> <p>simulasi dilakukan berdasarkan permodelan</p>	

					matematika dengan adsorben karbon aktif dan zeolite dengan 200kali pada kondisi steady state																																																																																																																																																																																																																																																																																
2009	Majlan, dkk	Hydrogen Purification using CPSA System for Fuel Cell	melihat desain adsorben CPSA (Compact Pressure Swing Adsorption) yang didesain 4 bed	Activated Carbon	 <p>CPSA didesain dengan mengkombinasi 4 bed adsorpsi yang beeropersai secara simultan pada proses yang berbeda dengan PSA.</p>																																																																																																																																																																																																																																																																																
2007	Nikolic D., Giovano glou, A., Georgiad is, Michael C.,	Hydrogen Purification By Pressure Swing Adsorption	Pengembangan proses PSA yang dirancang dan dimodelkan berdasarkan beberapa konfigurasi PSA untuk memurnikan hidrogen dan karbon dioksida dari SMROG (steam methane reforming off-gas).		<p>(2+1) configuration</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B-1</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> </tr> <tr> <td>B-2</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>A</td> <td>R</td> </tr> <tr> <td>B-3</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P+</td> </tr> </tbody> </table> <p>(4+2)<sup>2</sup> configuration</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> <th>14</th> <th>15</th> <th>16</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B-1</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> </tr> <tr> <td>B-2</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>B-3</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>B-4</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> </tr> <tr> <td>B-5</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>E</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> </tr> <tr> <td>B-6</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> </tr> </tbody> </table> <p>(4+2)<sup>3</sup> configuration</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> <th>10</th> <th>11</th> <th>12</th> <th>13</th> <th>14</th> <th>15</th> <th>16</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B-1</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>P+</td> </tr> <tr> <td>B-2</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> </tr> <tr> <td>B-3</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>B-4</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>B</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>E</td> <td>P+</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>R</td> <td>R</td> </tr> <tr> <td>B-5</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ER1</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>ER1</td> </tr> <tr> <td>B-6</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> <td>B</td> <td>P</td> <td>P</td> <td>ER1</td> <td>P+</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>ED1</td> </tr> </tbody> </table> <p>Berdasarkan sistem industri yang sudah ada, memperbarui dan memodifikasi konfigurasi PSA terdiri dari dua grup kolom adsorpsi dengan berbeda langkah pada siklusnya yang sudah dirancang dan disimulasikan dengan susunan permodelan. Hasil simulasi dibandingkan dengan proses yang sudah ada sebelumnya.</p>		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	E	E	P+	B-2	B	B	E	E	P+	A	A	R	R	A	R	B-3	A	A	B	P	P+	A	A	B	P	P+		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E	E	E	ER1	P+	B-2	E	E	E	P+	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E	B-3	B	B	E	E	E	E	ER1	P+	A	A	R	R	B	B	B	B-4	B	B	B	B	B	E	E	E	E	ER1	P+	A	A	R	R	B-5	A	A	E	B	B	B	P	P	A	A	ED1	B	B	P	P	B-6	B	P	P	P+	A	A	ED1	B	B	P	P	P+	A	A	ED1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E	E	E	P+	P+	B-2	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R	B	B	B	B	E	E	B-3	B	B	E	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R	B	B	B	B-4	B	B	B	B	B	E	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R	B-5	A	A	ER1	B	P	P	ER1	P+	A	A	ED1	B	P	P	ER1	B-6	P	P	ER1	P+	A	A	ED1	B	P	P	ER1	P+	A	A	ED1
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																																																																																																																																																																																																																																											
B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	E	E	P+																																																																																																																																																																																																																																																																										
B-2	B	B	E	E	P+	A	A	R	R	A	R																																																																																																																																																																																																																																																																										
B-3	A	A	B	P	P+	A	A	B	P	P+																																																																																																																																																																																																																																																																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16																																																																																																																																																																																																																																																																					
B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E	E	E	ER1	P+																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-2	E	E	E	P+	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-3	B	B	E	E	E	E	ER1	P+	A	A	R	R	B	B	B																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-4	B	B	B	B	B	E	E	E	E	ER1	P+	A	A	R	R																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-5	A	A	E	B	B	B	P	P	A	A	ED1	B	B	P	P																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-6	B	P	P	P+	A	A	ED1	B	B	P	P	P+	A	A	ED1																																																																																																																																																																																																																																																																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16																																																																																																																																																																																																																																																																					
B-1	A	A	R	R	B	B	B	B	B	E	E	E	E	P+	P+																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-2	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R	B	B	B	B	E	E																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-3	B	B	E	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R	B	B	B																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-4	B	B	B	B	B	E	E	E	E	P+	P+	A	A	R	R																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-5	A	A	ER1	B	P	P	ER1	P+	A	A	ED1	B	P	P	ER1																																																																																																																																																																																																																																																																						
B-6	P	P	ER1	P+	A	A	ED1	B	P	P	ER1	P+	A	A	ED1																																																																																																																																																																																																																																																																						

<p>1997</p>	<p>Jaeyoung Yang dan Chang Ha Lee</p>	<p>Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A</p>	<p>Mengembangkan parameter operasi terhadap kinerja PSA dengan model matematika</p>	<p>Zeolite 5A</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Kemurnian hidrogen akan menurun cukup cepat pada tekanan sekitar 8 atm sedangkan recovery hidrogen yang semakin turun saat tekanan yang semakin rendah.</p>																									
<p>1986</p>	<p>Doong, S J dan Yang R T.,</p>	<p>Hydrogen Purification by The Multibed Process Swing Adsorption</p>	<p>Memodelkan PSA multibed berdasarkan pemurnian dan recovery hidrogen</p>	<p>Zeolite 5A</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">  <table border="1" data-bbox="1783 770 2130 887"> <thead> <tr> <th>Step</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Adsorption</td> <td>EQ1</td> <td>CD</td> <td>EQ2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>CD</td> <td>Purge</td> <td>EQ1</td> <td>R</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>EQ1</td> <td>CD</td> <td>EQ2</td> <td>Purge</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>EQ1</td> <td>R</td> <td>Adsorption</td> <td>EQ1</td> </tr> </tbody> </table> <p>EQ – Equalization            CD – Cocurrent depressurization            CD – Countercurrent depressurization            R – Repressurization</p> <p>— Cocurrent flow            — Countercurrent flow</p> </div> <p>Pemisahan variabel dengan proses PSA berdasarkan efek perbandingan purge to feed, total cycle time, tekanan akhir dari cocurrent clowdown, dan suhu ambient.</p>	Step	1	2	3	4	1	Adsorption	EQ1	CD	EQ2	2	CD	Purge	EQ1	R	3	EQ1	CD	EQ2	Purge	4	EQ1	R	Adsorption	EQ1
Step	1	2	3	4																										
1	Adsorption	EQ1	CD	EQ2																										
2	CD	Purge	EQ1	R																										
3	EQ1	CD	EQ2	Purge																										
4	EQ1	R	Adsorption	EQ1																										

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) menggunakan 2 bed adsorber didapatkan hidrogen tertinggi sebesar 99,92% pada tekanan 7 bar dengan adsorben karbon aktif yang diletakkan pada bed 1 dan silica gel yang ditempatkan pada bed 2 PSA.
2. Pada sistem PSA dengan 4 bed adsorber diperoleh kemurnian hidrogen sebesar 99,99% pada tekanan 4 bar menggunakan adsorben silica gel maupun karbon aktif.
3. Simulasi menggunakan *data existing condition* dari PT Pertamina RU IV Cilacap menghasilkan kemurnian tertinggi sebesar 87,69% pada tekanan 34 bar sedangkan pada PT Pertamina Cilacap menghasilkan kemurnian hidrogen sebesar 99,5% dengan menggunakan adsorben molecular sieve pada dua bed adsorber PSA.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, S., Fernando, S., Haryanto, A., (2007), Production of Hydrogen By Steam Reforming of Glycerin Over Alumina-Supported Metal Catalysts, *Catal. Today*. 129, hal. 355–364.
- Adhinata, F., dan Fauziyah, M. (2015), *Pra Desain Pabrik Hidrogen dari Batubara*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- AspenTech, (2011), *Aspen Physical Property System: Physical Property Methods*, Aspen Technology Inc, USA
- Atkins, P.W. (1997), *Kimia Fisika Jilid II*, Erlangga, Jakarta.
- Austin, G T. (1984), *Shreve's Shemical Process Industries 5<sup>th</sup> Edition*, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore.
- Beck, J K., (2014), *Efficient Targeted Optimisation for the Design of Pressure Swing Adsorption Systems for CO<sub>2</sub> Capture in Power Plants*, University College London, London.
- Biswas P., Agrawal S., dan Sinha S., (2010), “Modeling and Simulation for Pressure Swing Adsorption System for Hydrogen Purification”, *Chem. Biochem. Eng. Q.* Vol. 24(4), hal. 409–414
- BPS, Administrator. (2014), *Komoditi Ekspor-Import*. <http://www.bps.go.id/>. Diakses pada hari Rabu, 8 Oktober 2014, pukul 19.31 WIB
- CBM Asia Development Corp (Indonesia Coal Bed Methane) diakses dan diunduh dari [www.cbmasia.ca](http://www.cbmasia.ca)
- Chen, C C dan Mathias, P M., (2002), “Applied Thermodynamics for Process Modeling”, *AIChE Journal*. Vol. 48, No. 2
- Criterion Catalyst. (2005), *Hydrocracking Process Description and Criterion / Zeolyst Hydrocracking Catalyst Application*. Criterion Catalyst and Technologies, Houston.
- Doong, S J dan Yang R T., (1986), “Hydrogen Purification by The Multibed Process Swing Adsorption”, *Elsevier Science Publisher, Reactive Polymers*, Vol. 6, hal. 7-13
- Elbrahim, M A., Arsalan M R G., Fatemi, S., (2011), “Modeling and Simulation of an Industrial Hydrogen Purification Unit in Pressure Swing Adsorption Process”, *7th International Chemical Engineering Congress & Exhibition*
- Elvers, B. (2003), *Ullmann's Enc. of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, USA.
- Emrani, A S., (2011), “A decision Tree for Technology Selection of Nitrogen Production Plants Tehran”, *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*.
- Flanigen EM. (1980), Molecular Sieve Zeolite Technology-The First Twenty-Five Years. Plenary Paper-Technology. *Pure Appl Chem* 52 : 2191-2211

- Geankoplis. (2003), *Transport Processes and Unit Operations 4<sup>th</sup> Edition*. Prentice Hall, Inc, New Jersey.
- Gubta RB, Demirbas A. (2010), *Gasolin, Diesel, and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants*. Cambridge : Cambridge Univ Pr.
- Iriondo A., Barrio V.L., Cambra J.F., Arias P.L., Güemez M.B., Navarro R.M., Sanchez-Sanchez M.C., dan Fierro J.L.G, (2009), Influence of La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modified support and Ni and Pt active phases on glycerol steam reforming to produce hydrogen. *J Catal. Commun.*, 1275-1278
- Javadi, S E., Farniaei M., dan Shahcheraghi M., (2014), “Numerical Simulation Of A H<sub>2</sub>-Psa. Case Study: The Jam Petrochemical Industrial Plant In The Southern Pars Zone”, *Petroleum & Coal*. Vol 56 (1), hal. 110-115, ISSN 1337-7027
- Khaidir. (2011), *Modifikasi Zeolite Alam sebagai Material Molecular Sieve dan Aplikasinya pada Proses Dehidrasi Bioetanol*, Institut Pertanian Bogor, Bogor
- Khopkar. (2003), *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta.
- Lin Lin. (1997), *Numerical Simulation of Pressure Swing Adsorption Proces*, Xidian Univercity, China
- Lopes, F V.S., Grande, C A., dan Rodrigues, A E., (2011), “Activated Carbon For Hydrogen Purification By Pressure Swing Adsorption: Multicomponent Breakthrough Curves And PSA Performance”, *Elsevier Chemical Engineering Science*, Vol. 66, hal. 303–317.
- Lopes, F V.S., Grande, C A., dan Rodrigues A E., (2012), “Fast-cycling VPSA for Hydrogen Purification”, *Elsevier, Fuel* Vol. 93 , hal. 510–52
- Majlan, E H., Wan Daud W R., Iyuke S E., Mohamad A B., Kadhum A H., Mohammad A W., Takriff M. S., dan Bahaman N., (2009), “Hydrogen purification using compact pressure swing adsorption system for fuel cell”, *International Journal Of Hydrogen Energy*, Vol. 34, hal. 2771–2777
- Mc Cabe. (2001). *Unit Operation of Chemical Engineering*, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore.
- Mortimer M, Taylor P. (2002), *Chemical Kinetics and Mechanism*. Cambridge : RSC.
- Muliawati N. (2008). *Hidrogen sebagai Sel Bahan Bakar: Sumber Energi Masa Depan*. Teknik Kimia UNILA, Lampung.
- Mumpton FA. (1999), La Roca Magica : Uses Of Natural Zeolite In Agriculture And Industry. *Proc Natl Acad Sci* 96 : 3463-3470.
- Nikolic D., Giovanoglou, A., Georgiadis, Michael C., (2007), Hydrogen Purification By Pressure Swing Adsorption, *Department of Engineering and Management of Energy Resources, Mesir*.

- Perry, R H., Green, D W., Maloney, J O. (1984). *Perry's Chemical Engineer's Handbook 6<sup>th</sup>*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Ravindran, A., Ragsdell, K., M., Reklaitis, G., V.,. (2006), *Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- Sadighi S., Asgari M., Anisi H., dan Mohammadi H., (2014), "Designing A Commercial Scale Pressure Swing Adsorber For Hydrogen Purification", *Petroleum & Coal*, Vol. 56(5), hal. 552-561, ISSN 1337-7027
- Seader. (2011). *Separation Process Principles Chemical and Biochemical Operations 3<sup>rd</sup>*. John Wiley and Sons Inc., USA
- Siregar, Y D I, (2010), Produksi Gas Hidrogen dari Limbah Aluminium. *Jurnal Valensi*, Vol. 2 No. 1 Hal. 362-367, ISSN : 1978 - 8193
- Skartstro, C W., (1957), *Method And Apparatus For Fractionating Gaseous Mixtures By Adsorption*, Exxon Research Engineering Co, USA.
- Smith, R. 2005. *Chemical Process Design and Integration*. John Wiley & Sons, Ltd., England
- Sol, A., Geun, L. D., You, Y. W., Hyun, K. K., Min, O., dan Ha, L. C., (2012), Layered Two- and Four- Bed PSA Processes for Hydrogen Recovery from Coal Gas, *Chemical Engineering Science* , 413-423
- Suryawan, B., (2004), *Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air*, Universitas Indonesia, Depok
- Suzuki, M., (1990), *Adsorption Engineering*, Kodansha Ltd, Tokyo.
- Uehara, I., (2005), "Separation and Purification of Hydrogen", *Energy Carriers and Conversion Systems Vol 1*
- Wahyu, H., Rahmawati, I., Najmudin, N., Awaliyah, N, (2013), *Kumpulan Laporan Praktikum Kimia Anorganik*, Jakarta: UIN Syahid.
- Widhiastuti, F., & Biansha, F. (2014). *Pra Desain Pabrik Hidrogen dari Coal Bed Methane*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Yang, R T, (1986), *Gas Separation by Adsorption Processes*, Butterworth Publisher, USA.
- Yang J Y, Lee C H dan Chang J W. (1997), "Separation of Hydrogen Mixtures by a Two-Bed Pressure Swing Adsorption Process Using Zeolite 5A", *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 36 hal. 2789-2798.
- Zargarani J., dan Bahmani M., (2011), "Simulation Of Separation Of Valuable Components From Tehran Refinery Flare Stack Gases", *Petroleum & Coal*, Vol. 53(1), hal. 78-83, ISSN 1337-7027

## BIODATA PENULIS



**Nama Lengkap** : Vibianti Dwi Pratiwi  
**Nama Panggilan** : Atik  
**Tempat, Tanggal Lahir** : Blitar, 19 Januari 1991  
**Agama** : Islam  
**Alamat Rumah** : Delta Casabella 29,  
Delta Sari Baru, Waru, Sidoarjo  
**No. HP** : 085730520808  
**Email** : vibiantidwi@yahoo.co.id

### Riwayat Pendidikan

Jenjang	Nama Sekolah/Institut	Jurusan	Periode
Master	Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya	S2 Teknik Kimia	2014-2016
Sarjana	Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya	S1 Teknik Kimia	2012-2014
Sarjana Muda	Institut Pertanian Bogor	D3 Analisis Kimia	2009-2012
SMA	SMA N 21 Surabaya	IPA	2006-2009
SMP	SMP N 7 Surabaya	-	2003-2006
SD	SDN Perak Barat 1 Surabaya	-	1997-2003