

# Analisis Konfigurasi Sistem Produksi Hidrogen dari Etanol Produk Fermentasi yang Melibatkan Unit Membran

Lisa Legawati, Hari Rionaldo, Zulfansyah

Laboratorium Pengendalian dan Perancangan Proses

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Riau

Kampus Binawidya Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru 28293

zulfansyah@unri.ac.id

## Abstract

Ethanol from fermentation process must be purified to 99% to meet the requirements as a fuel. Ethanol and water are azeotrope mixture, so that the separation requires larger investment and greater energy. Produce hydrogen from ethanol reforming is one solution to get another energy source in the form of environmentally friendly hydrogen gas. H<sub>2</sub> production from ethanol has advantages when compared with other H<sub>2</sub> production techniques. Nowadays, hydrogen is one of alternative energy source that is currently widely studied and developed as a fuel for fuel cells to generate electricity. Membrane integration of hydrogen production system by ethanol reforming can produce hydrogen gas with high purity and suitable for use as a fuel for fuel cells. There are three types of configurations involving a palladium based membrane is simulated to obtain the best type of configuration, viewed from the conversion and yield of the product. Ethanol reforming membrane reactor is the best configuration type, because it produces the best result viewed from the yield generated, amounting to 21,4%. However, it should be noted that the merger of the membrane unit with the reaction can reduce the hydrogen permeability.

**Keyword :** ethanol reforming, fuel cell, hydrogen, membrane palladium, WGSR.

## 1 Pendahuluan

Etanol hasil dari proses fermentasi kurang efisien, karena membutuhkan tahap pemurnian untuk mendapatkan tingkat kemurnian sebesar 99% agar memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar. Proses tersebut membutuhkan investasi dan energi yang lebih besar. Oleh sebab itu, reformasi etanol menjadi hidrogen merupakan solusi yang tepat untuk mendapatkan sumber energi lain yang ramah lingkungan.

Etanol merupakan sumber hidrogen terbarukan yang dapat diperoleh dari *biomass* melalui proses fermentasi, sehingga dapat digunakan untuk memproduksi hidrogen sebagai *fuel cell* melalui teknik *catalytic steam reforming*. Selain itu, etanol juga digunakan sebagai sumber energi yang tidak menghasilkan emisi seperti NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, partikulat dan bahan-bahan beracun lainnya.

Dalam bidang energi, gas hidrogen merupakan sumber energi ramah lingkungan, karena tidak menghasilkan residu atau emisi gas berbahaya. Oleh sebab itu, saat ini hidrogen merupakan salah satu sumber energi alternatif yang banyak diteliti dan dikembangkan sebagai *fuel cell* untuk membangkitkan energi listrik.

*Fuel cell* merupakan sumber energi yang menarik untuk dikembangkan, karena dapat mencapai efisiensi yang lebih besar daripada sumber energi lainnya yang diperoleh dengan menggunakan teknik konvensional.

Produksi gas hidrogen dari *ethanol reforming* lebih menguntungkan daripada teknik produksi gas hidrogen lainnya, seperti *steam reforming* dari etanol dan hidrokarbon. Etanol lebih mudah digunakan pada proses pembentukan dan juga bebas sulfur.

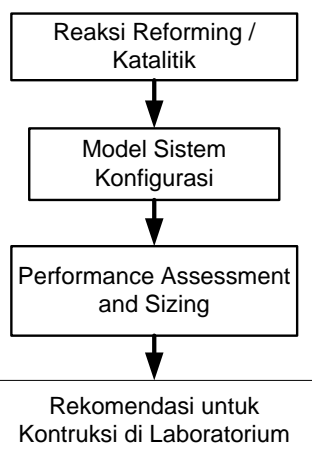
Pada sistem produksi hidrogen dari etanol terdapat tiga tipe konfigurasi yang berbeda. Perbedaan tipe konfigurasi tersebut akan mempengaruhi *yield* gas hidrogen dan H<sub>2</sub> *recovery* yang dihasilkan. Masing-masing tipe konfigurasi melibatkan membran sebagai salah satu dari unit proses yang digunakan. Integrasi membran pada sistem produksi hidrogen melalui *ethanol reforming* mampu menghasilkan gas hidrogen dengan kemurnian yang tinggi dan cocok digunakan sebagai *fuel cell*.

## 2 Metodologi

Metode percobaan yang digunakan adalah tiga tipe konfigurasi sistem produksi hidrogen dengan melibatkan membran paladium yang disimulasikan untuk mendapatkan tipe konfigurasi terbaik berdasarkan konversi dan *yield* yang dihasilkan. Model konfigurasi *ethanol reforming* terdiri dari; ER-WGSR-MS, ER-WGSR/MS dan ER/WGSR/MS.

Tahapan analisis konfigurasi sistem produksi hidrogen dari etanol, disajikan pada Gambar 1. Dimulai dari mengkoleksi data laju reaksi, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan model sistem konfigurasi. Tiap

konfigurasi dianalisis kemudian didapat hasil yang selanjutnya dapat digunakan untuk rekomendasi data percobaan di laboratorium.



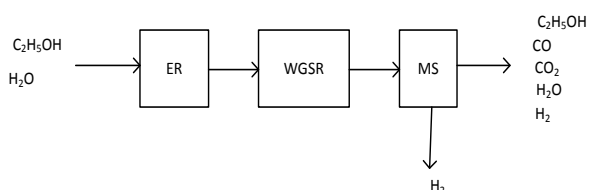
Gambar 1. Tahap analisis konfigurasi

## 2.1 Konfigurasi Sistem Produksi

### a. Konfigurasi ER-WGSR-MS

Pada konfigurasi *ethanol reforming* ER-WGSR-MS digunakan dua buah reaktor dalam *Ethanol Reforming* (ER) dan *Water Gas Shift Reaction* (WGSR), yaitu reaktor unggun diam dengan menggunakan katalis Ni-Al dan Fe/Cr.

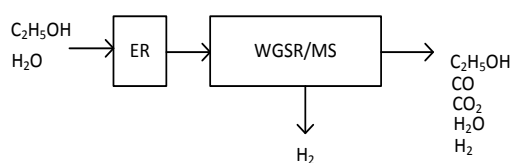
Etanol diumpangkan kedalam reaktor ER. Adapun produk dari reaksi yang terjadi didalam reaktor ER merupakan campuran dari beberapa komponen, yaitu CO, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, dan H<sub>2</sub>O. Campuran dari beberapa komponen tersebut diumpangkan kedalam reaktor WGS, dimana dalam reaktor WGS ini terjadi reaksi antara CO dan H<sub>2</sub>O. Campuran gas H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, CO, dan CO<sub>2</sub> keluaran reaktor WGS diumpangkan kedalam *membrane separator* untuk mendapatkan gas H<sub>2</sub> murni.



Gambar 2. Konfigurasi ER-WGSR-MS

### b. Konfigurasi ER-WGSR/MS

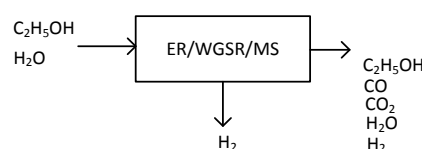
Pada konfigurasi ER-WGSR/MS, *membrane separator* (MS) juga berfungsi sebagai reaktor WGS. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan katalis pada bagian *tube* di *membrane separator*. Gas produk dari reaktor ER digunakan sebagai gas umpan pada reaktor membran katalitik.



Gambar 3. Konfigurasi ER-WGSR/MS

### c. Konfigurasi ER/WGSR/MS

Pada konfigurasi ER/WGSR/MS ini, *membrane separator* berfungsi sebagai reaktor (reaktor *membrane separation* (RMS)). Dimana, dalam *membrane separator* terjadi reaksi ER dan WGS.

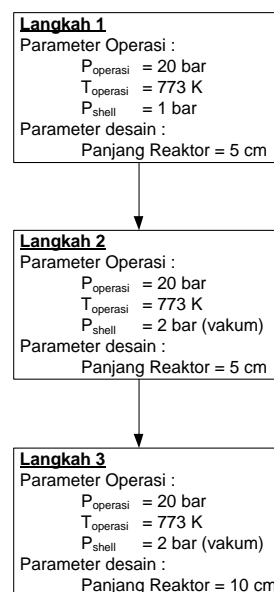


Gambar 4. Konfigurasi ER/WGSR/MS

## 2.2 Performancedan Optimasi

*Performance* tiap skema dinyatakan dalam perolehan gas hidrogen. Optimasi parameter yang dilakukan meliputi parameter operasi, dinyatakan oleh pengaruh tekanan di dalam *shell* pada *membrane separator* dan parameter desain dinyatakan oleh pengaruh panjang reaktor.

Langkah optimasi yang digunakan dalam tiap konfigurasi terdiri 3 langkah yang dapat dilihat pada Gambar 5.



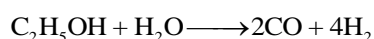
Gambar 5. Tiga langkah optimasi pada tiap skema konfigurasi *ethanol reforming*

Perbedaan masing-masing langkah optimasi adalah parameter operasi dan desain, yaitu tekanan pada *shell* dan panjang reaktor. Adapun pengambilan variasi parameter operasi dan desain yaitu tekanan di *shell* (1 dan vakum 2 bar) serta panjang reaktor (5 dan 10 cm) didasarkan pada kondisi yang memungkinkan dilakukan di laboratorium serta reaktor *membrane palladium* yang tersedia di komersial. Masing-masing skema menggunakan ketiga langkah optimasi untuk mendapatkan konfigurasi terbaik pada sistem produksi hidrogen.

### 2.3 Model Persamaan Matematika dan Reaksi

#### a. Ethanol Reforming (ER)

Reaksi yang terjadi pada reaktor ER merupakan reaksi antara etanol dan air.



Persamaan laju reaksi :

$$r_1 = C_1 k \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P_a^{1,25} P_b^{-0,125} \quad (1)$$

Persamaan neraca massa :

$$\frac{dF_{C_2H_5OH}}{dz} = -r_1 \quad (2)$$

$$\frac{dF_{H_2O}}{dz} = -r_1 \quad (3)$$

$$\frac{dF_{CO}}{dz} = 2r_1 \quad (4)$$

$$\frac{dF_{H_2}}{dz} = 4r_1 \quad (5)$$

Nilai-nilai parameter operasi dan kinetika yang digunakan diperoleh dari hasil penelitian Brian James dan Jeff Kalinoski (2008), sebagai berikut :

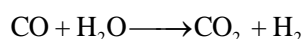
$$k_0 = 0,013 \text{ mol}/(\text{gcat}\cdot\text{s}\cdot\text{kPa}^{1,07})$$

$$E_A = 39,3 \text{ kJ/mol}$$

$$C_1 = \text{Derating Factor} = 38\% - 49\%$$

#### b. Water Gas Shift (WGS)

Reaksi yang terjadi di WGS mengikuti persamaan:



Persamaan laju reaksi :

$$r_1 = k \frac{P_{CO} P_{H_2O} - K_P^{-1} P_{CO_2} P_{H_2}}{1 + 4,4 P_{H_2O} + 13 P_{CO_2}} \quad (6)$$

Persamaan neraca massa :

$$\frac{dF_{CO}}{dz} = -r \quad (7)$$

$$\frac{dF_{H_2}}{dz} = r \quad (8)$$

$$\frac{dF_{H_2O}}{dz} = -r \quad (9)$$

$$\frac{dF_{CO_2}}{dz} = r \quad (10)$$

Nilai-nilai parameter operasi dan kinetika yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian Umiya (1991). Laju reaksi,  $r$ , dapat dilihat pada persamaan 6.  $K_p$  adalah tetapan kesetimbangan dan  $k$  adalah tetapan laju reaksi dengan nilai  $5,4 \times 10^3 \text{ [cm}^3(\text{STP}) \text{ cm}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ atm}^{-1}]$  pada temperatur 673 K.

#### c. Membrane Separation

Pada unit pemisahan membran, persamaan yang terlibat adalah:

$$J = AP(\bar{P}_{H_2O}^n - \bar{P}_{H_2O}^n) \quad (11)$$

Data permeabilitas membran yang digunakan didapatkan dari hasil penelitian Brian James dan Jeff Kalinoski (2008).

## 3 Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Konfigurasi ER-WGSR-MS

#### a. Langkah 1

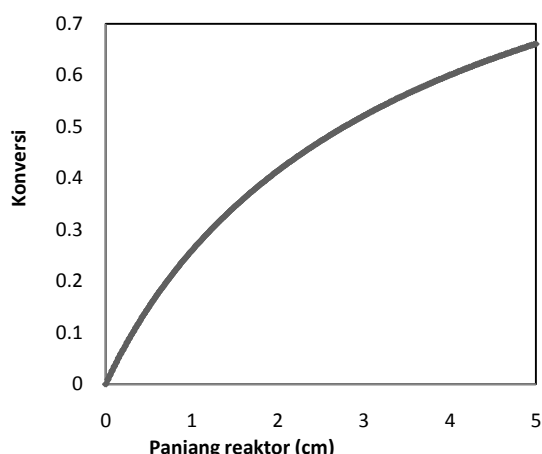
Berdasarkan parameter disain dan parameter operasi dari masing-masing langkah optimasi diperoleh konversi etanol dan konsentrasi komponen disepanjang reaktor. Dengan menggunakan konfigurasi ER-WGSR-MS serta langkah optimasi 1, konversi maksimum yang diperoleh pada reaktor ER adalah 66% etanol dan pada reaktor WGS diperoleh konversi gas CO sebesar 58%. *Yield* gas  $H_2$  yang diperoleh hingga keluaran reaktor WGS adalah sebesar 14,8% (perhitungan *yield* didasarkan pada perbandingan berat gas  $H_2$  yang diperoleh dibagi berat etanol yg masuk). Gas  $H_2$  murni yang keluar sebagai permeat pada *membrane separator* (MS) adalah sebesar 56% ( $H_2$  recovery).

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR-MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 1 diperoleh *yield*  $H_2$  sebesar 14,8% dan  $H_2$  recovery sebesar 56%.

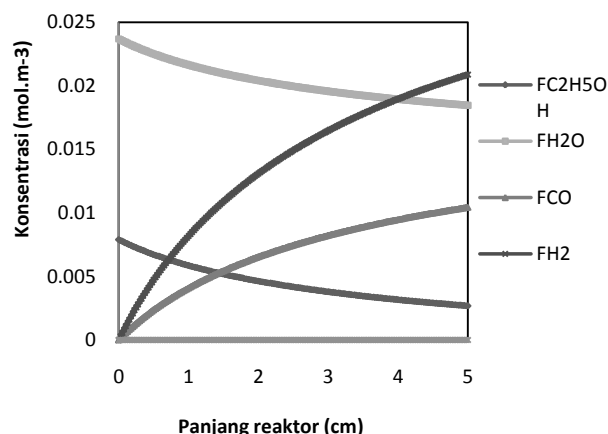
#### b. Langkah 2

Proses pemisahan gas  $H_2$  pada *membrane separation* sangat dipengaruhi oleh perbedaan tekanan parsial gas  $H_2$  pada bagian *shell* dan *tube*. Untuk meningkatkan  $H_2$  recovery maka salah satu caranya adalah dengan membuat tekanan pada bagian *shell* vakum yang merupakan langkah optimasi 2.

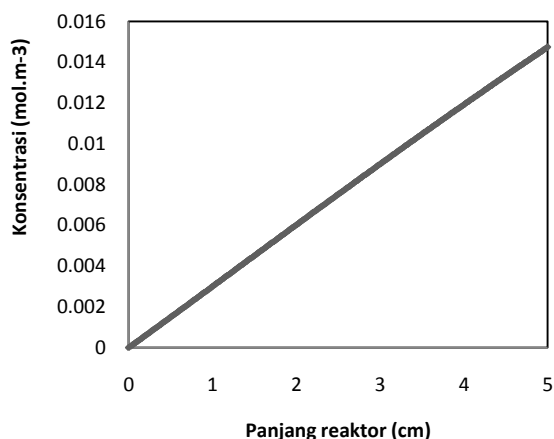
Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR-MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 2 diperoleh *yield*  $H_2$  sebesar 14,8% dan  $H_2$  recovery sebesar 72,5%.



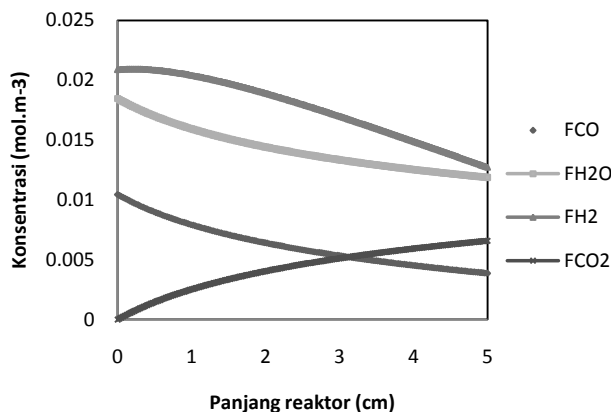
(a) Profil konversi etanol di reaktor ER



(b) Profil konsentrasikomponen di reaktor ER.



(c) Profil konsentrasi gas H<sub>2</sub> di reaktor membran WGS pada bagian shell.



(d) Profil konsentrasi komponen di reaktor membran WGS

**Gambar 6.** Profil konversi dan konsentrasi komponen di sepanjang reaktor

### c. Langkah 3

Langkah optimasi 3 dilakukan dengan tujuan meningkatkan perolehan *yield* H<sub>2</sub>. Dengan memperpanjang reaktor maka akan membuat waktu tinggal reaktan di dalam reaktor semakin lama. Hal ini diharapkan akan meningkatkan konversi etanol yang pada akhirnya akan meningkatkan *yield* H<sub>2</sub>.

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR-MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 3 diperoleh *yield* H<sub>2</sub> sebesar 17,9% dan H<sub>2</sub>recovery sebesar 100%.

Dengan membandingkan hasil pada konfigurasi ER-WGSR-MS untuk tiap langkah optimasi maka akan didapatkan kondisi operasi dan parameter desain yang terbaik untuk konfigurasi ER-WGSR-MS. Pada dasarnya, membuat kondisi vakum pada bagian shell di membrane separator akan meningkatkan H<sub>2</sub>recovery dan penambahan panjang reaktor akan mengakibatkan *yield* H<sub>2</sub> meningkat. Tabel 1 menunjukkan perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>recovery untuk tiap langkah optimasi.

**Tabel 1.** Perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>recovery untuk tiap langkah optimasi

	Konfigurasi ER-WGSR-MS		
	Langkah 1	Langkah 2	Langkah 3
<i>Yield</i> H <sub>2</sub>	14,8%	14,8%	17,9%
H <sub>2</sub> Recovery	56,2%	72,5%	100%
Laju alir gas H <sub>2</sub> murni(mol/detik)	0.011827	0.019626	0.034273

Dari Tabel 1 dapat dinyatakan bahwa langkah 3 merupakan pilihan yang terbaik untuk konfigurasi ER-WGSR-MS.

### 3.2 Konfigurasi ER-WGSR/MS

#### a. Langkah 1

Gambar 6 merupakan grafik profil konversi etanol serta gas CO di reaktor membran katalitik WGS dan profil konsentrasi komponen di sepanjang reaktor.

Pada Gambar 6.a dapat dilihat konversi maksimum yang diperoleh pada reaktor ER adalah 66% etanol dan pada reaktor membran WGS adalah 63% gas CO. *Yield* gas H<sub>2</sub> yang diperoleh adalah sebesar 15,1%. Sedangkan pada Gambar 6.d dapat dilihat konsentrasi gas H<sub>2</sub> mengalami peningkatan disepanjang reaktor membran WGS.

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 1 diperoleh *yield* H<sub>2</sub> sebesar 15,1% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 53,6%.

b. Langkah 2

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 2 diperoleh *yield* H<sub>2</sub> sebesar 15,3% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 75,4%.

c. Langkah 3

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER-WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 3 diperoleh *yield* H<sub>2</sub> yang lebih besar yaitu 20,2% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 100%. Dengan membandingkan hasil pada konfigurasi ER-WGSR/MS untuk tiap langkah optimasi maka akan didapatkan kondisi operasi dan parameter desain yang terbaik untuk konfigurasi ER-WGSR/MS. Tabel 2 menunjukkan perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> recovery untuk tiap langkah optimasi.

**Tabel 2.** Perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> recovery untuk tiap langkah optimasi

Parameter	Konfigurasi ER-WGSR/MS		
	Langkah 1	Langkah 2	Langkah 3
Yield H <sub>2</sub>	15,1%	15,3%	20,2%
H <sub>2</sub> Recovery	53,6%	75,4%	100%
Laju alir gas H <sub>2</sub> murni(mol/detik)	0.014742	0.020972	0.036829

Dari Tabel 2 dapat dinyatakan bahwa langkah 3 merupakan pilihan yang terbaik untuk konfigurasi ER-WGSR/MS.

3.3 Konfigurasi ER/WGSR/MS

a. Langkah 1

Berdasarkan parameter disain dan parameter operasi dari langkah optimasi 1 diperoleh konversi etanol dan konsentrasi komponen di reaktor *membrane separation* (RMS).

Dengan menggunakan langkah optimasi 1 pada konfigurasi ER/WGSR/MS ini, diperoleh konversi maksimum etanol di RMS adalah 70,2% dan *yield* gas H<sub>2</sub> yang diperoleh adalah sebesar 15,2%. Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER/WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 1 diperoleh gas H<sub>2</sub> sebesar 15,2% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 42,8%.

b. Langkah 2

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER/WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 2 diperoleh *yield* gas H<sub>2</sub> sebesar 15,9% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 62,6%.

c. Langkah 3

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa untuk konfigurasi ER/WGSR/MS dengan menggunakan kondisi operasi dan desain langkah 3 diperoleh *yield* gas H<sub>2</sub> sebesar 21,4% dan H<sub>2</sub> recovery sebesar 92,8%.

Dengan membandingkan hasil pada konfigurasi ER/WGSR/MS untuk tiap langkah optimasi maka akan didapatkan kondisi operasi dan parameter desain yang terbaik untuk skema 2. Tabel 3 menunjukkan perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub> recovery untuk tiap langkah optimasi.

**Tabel 4.** Perbandingan masing-masing konfigurasi jika menggunakan langkah 3

Parameter	Langkah 3		
	Konfigurasi ER-WGSR-MS	Konfigurasi ER-WGSR/MS	Konfigurasi ER/WGSR/MS
<i>Yield</i> H <sub>2</sub>	17,9%	20,2%	21,4%
H <sub>2</sub> Recovery	100%	100%	92,8%
Laju alir gas H <sub>2</sub> murni(mol/detik)	0.034273	0.036829	0.0361
<b>Parameter desain</b>			
Diameter reaktor	0,0508 m	0,0508 m	0,0508 m
Panjang reaktor	ER = 10 cm WGS = 10cm MS = 10 cm	ER = 10 cm MWGS = 10 cm	RMS = 10 cm
<b>Parameter Operasi</b>			
Tekanan	≅ 20 bar	≅ 20 bar	≅ 20 bar
Temperatur	973 K	973 K	973 K
Tekanan shell di Membran Separation	Vakum 2 bar	Vakum 2 bar	Vakum 2 bar

**Tabel 3.** Perbandingan *yield* H<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>recovery untuk tiap langkah optimasi

Parameter	KonfigurasiER/WGSR/MS		
	Langkah 1	Langkah 2	Langkah 3
<i>Yield</i> H <sub>2</sub>	15,2%	15,9%	21,4%
H <sub>2</sub> Recovery	42,8%	62,6%	92,8%
Laju alir gas H <sub>2</sub> murni(mol/detik)	0.011888	0.018153	0.0361

Dari Tabel 2 dapat dinyatakan bahwa langkah 3 merupakan pilihan yang terbaik untuk konfigurasi ER/WGSR/MS.

#### 4 Kesimpulan

Dari data yang diperoleh, langkah 3 memberikan hasil terbaik untuk masing-masing konfigurasi. Pada Tabel 4 ditampilkan perbandingan masing-masing konfigurasi jika menggunakan langkah 3.

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa konfigurasi ER/WGSR/MS menggunakan langkah optimasi 3 memberikan *yield* H<sub>2</sub> yang terbesar. Gas H<sub>2</sub> yang terbentuk dari reaksi ER dan WGS paling banyak diperoleh jika menggunakan konfigurasi ER/WGSR/ MS langkah 3. Namun, laju alir gas H<sub>2</sub> murni yang terbanyak diperoleh jika menggunakan konfigurasi ER-WGSR/MS langkah 3. Apabila laju alir gas H<sub>2</sub> yang diinginkan tanpa memperhatikan variabel lainnya, maka konfigurasi ER-WGSR/MS langkah 3 merupakan konfigurasi, parameter desain, dan parameter operasi yang terbaik. Jika memperhatikan variabel ekonomi disarankan menggunakan konfigurasi ER/WGSR/MS langkah 3 karena kenaikan laju alir gas H<sub>2</sub> murni jika

menggunakan ER-WGSR/MS langkah 3 tidak terlalu signifikan (+ 0,0007 mol/detik) dibandingkan investasi yang harus dikeluarkan untuk menambah kebutuhan reaktor.

#### Daftar Pustaka

- Akande A.J. 2005. Production of Hydrogen by Reforming of Crude Ethanol. Tesis Magister, University of Saskatchewan.
- Budi, Y, W., dan Rionaldo, H. 2009. "Pemodelan dan Simulasi Reaktor Membran Berbasis Pd/Ag untuk Water Gas Shift Reaction". Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Fogler, H. S. 1999. Element of Chemical Reaction Engineering, Third Edition. Prentice-Hall International inc.
- Garcia V, Lopez E, Serra Maria, and Llorca J.2008. Dynamic modeling of a three-stage low-temperature ethanol reformer for fuel cell application. Institut de Robotica I Informatica Industrial (CSIC-UPC), Llorens I Artigas 4-6, 08028, Barcelona, Spain.
- James, B and Kalinoski, J. 2008. "Analysis of Ethanol Reforming System Configurations". Directed Technology Inc. Arlington.
- Uemiya, S., Sato,N., Ando,H., dan Kikuchi, E. 1991. "The Water Gas Shift Reaction Assisted by a Palladium Membrane Reactor". Industrial & Engineering Chemistry Research, California.