



Kajian Konsumsi Energi Spesifik Pada Reaksi *Steam Reforming* untuk Produksi Gas Hidrogen Menggunakan Simulasi *Software* Aspen HYSYS

Karina Diah Rosa Ekawati, Setiadi

Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Kampus UI, Depok, 16424, Indonesia

*Alamat email penulis koresponden: setiadi@chem.ui.ac.id, karina.diah@office.ui.ac.id

Abstrak

Hidrogen memiliki potensi yang tinggi sebagai energi bahan bakar ramah lingkungan yang penting untuk dikembangkan demi keberlanjutan energi di masa depan. Gas ini dapat diproduksi secara industri melalui reaksi *steam reforming*. Di industri, reaksi ini membutuhkan banyak energi karena memerlukan kebutuhan energi input yang tinggi karena reaksi endotermik yang tinggi. Kajian ini dikhususkan untuk mengevaluasi konsumsi energi spesifik untuk reaksi *steam reforming* dalam menghasilkan gas hidrogen murni dalam skala produksi komersial. Konsumsi energi ditentukan dengan perhitungan model keseimbangan material dan energi berdasarkan proses produksi hidrogen. Perhitungan model proses dilakukan dengan bantuan program perhitungan perangkat lunak Aspen HYSYS. Konsumsi energi akan disimulasikan untuk rentang laju produksi gas hidrogen yaitu 3000, 6000, 9000, 12000 lb/jam, komposisi metana di umpan 85,78; 90; 95; dan 100% mol, dan laju alir mol umpan steam $3\times$ dari laju alir umpan gas ($S/C=3$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsumsi energi spesifik pada proses produksi gas hidrogen sebesar 0,30 - 0,35 (10^5 Btu/lb). Komposisi metana 100% memiliki rentang konsumsi energi spesifik paling rendah yaitu 0,30 - 0,317 (10^5 Btu/lb) karena adanya pengaruh komposisi CO_2 pada umpan. Konsumsi energi spesifik terbesar terjadi pada unit proses *primary reformer*.

Kata kunci: Aspen HYSYS, gas hidrogen, konsumsi energi spesifik, *steam reforming*

PENDAHULUAN

Di Indonesia, penggunaan energi untuk tujuan industri diatur oleh undang-undang. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 14 Tahun 2012 tentang Manajemen Energi yang menjelaskan upaya terkait konservasi energi. Konservasi energi merupakan upaya untuk menjaga sumber daya energi dan mengoptimalkan penggunaannya. Konservasi energi dapat dicapai melalui manajemen energi, yang melibatkan pengurangan konsumsi energi melalui penggunaan energi yang efektif dan efisien. Seperti yang kita ketahui, permintaan energi di Indonesia sudah mencapai 1.220 juta barel setara minyak (KESDM, 2024). Saat ini, sumber energi masih didominasi oleh bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak mentah, dan gas alam. Bahan bakar fosil memiliki dampak buruk bagi lingkungan karena hasil pembakarannya menghasilkan emisi CO_2 , yang menyebabkan efek gas rumah kaca.

Pemanfaatan energi hidrogen (H_2) telah muncul sebagai alternatif potensial untuk mengatasi tantangan global terkait pemanasan global dan transisi ke sistem energi bersih. Hal ini karena saat dibakar, hidrogen hanya menghasilkan air (H_2O) sebagai produk samping. Menurut data dari IEA (2022), perkiraan kebutuhan produksi hidrogen global

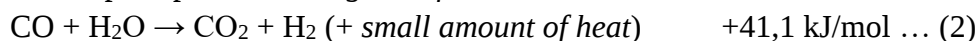
akan meningkat tajam dari 9 juta ton H₂ pada tahun 2021 menjadi 30 juta ton pada tahun 2030. Gas hidrogen akan banyak digunakan di sektor transportasi, diikuti oleh sektor industri dan bangunan. Hal ini menjadi dorongan untuk memproduksi lebih banyak H₂ untuk memenuhi kebutuhan sektor-sektor tersebut. Salah satu metode pembuatan gas hidrogen dapat dilakukan melalui reaksi *steam reforming* (Di Nardo *et al.*, 2024).

Reaksi *steam reforming* memanfaatkan reaksi kimia antara uap air dan metana untuk menghasilkan hidrogen. Proses ini berlangsung secara endotermis yang artinya membutuhkan atau menyerap energi dari lingkungan. Di dalam prosesnya, untuk memperoleh efisiensi yang tinggi, diperlukan reaksi *water gas shift reaction*. Selain itu, diperlukan juga unit absorpsi untuk memperoleh H₂ dengan kemurnian tinggi (Chen *et al.*, 2023). Pada proses ini bahan baku yang dibutuhkan berupa gas alam yang ketersediaannya terbatas. Dalam pemanfaatan gas alam sendiri membutuhkan biaya besar mulai dari survey geologi sampai tahap eksplorasi (Alimah & Dewita, 2008). Selain itu, *steam reforming* akan membutuhkan alat dan energi yang banyak untuk menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi. Umumnya hasil produk gas hidrogen didapatkan dalam bentuk *syngas* dengan kemurnian 79% wt (Song *et al.*, 2015). Reaksi kimia yang terjadi pada reaksi *steam reforming* ditunjukkan pada persamaan (1), (2), dan (3).

Reaksi pada reaksi *steam reforming*



Reaksi pada proses *water-gas shift*:



Reaksi Total:



(Di Nardo *et al.*, 2024)

Untuk memperoleh kajian konsumsi energi spesifik dibutuhkan *software* simulasi dalam memodelkan reaksi *steam reforming*. Reaksi *steam reforming* dapat dimodelkan oleh beberapa *software* simulasi, seperti Aspen HYSYS yang telah dilakukan oleh Welaya *et al.* (2012) dan Oni *et al.* (2022), Aspen Plus (Firmansyah & Silviyati 2020) dan PRO/II (Song *et al.*, 2015). Pada kajian ini, *software* yang dipilih untuk digunakan yaitu Aspen HYSYS. Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan kemampuan dalam mengolah data dan menghasilkan laporan yang rinci. Selain itu, Aspen HYSYS juga memiliki fitur objek sistem industri yang telah dilengkapi dengan fungsi transfer masing-masing objek dan dapat menentukan parameter spesifikasi objek serta beberapa variabel proses (Sopurta dkk, 2014).

BAHAN DAN METODE

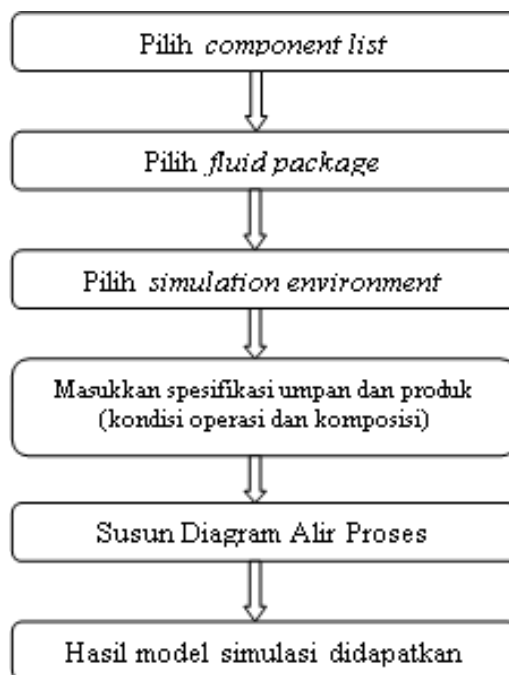
Bahan

Untuk mengkaji konsumsi energi, perlu sebuah model diagram alir proses yang menggambarkan rangkaian seluruh proses yang terlibat dalam produksi gas hidrogen. Sehingga dapat dengan mudah menentukan dan menganalisis konsumsi energi berdasarkan keseimbangan panas yang tersedia. Perangkat lunak Aspen HYSYS V12.1 (39.0.0.116) dengan SLM *version* 2020.12.0.610 digunakan untuk membuat pemodelan atau simulasi dari proses-proses tersebut.

Laju produksi gas hidrogen ditentukan di awal simulasi yaitu 3000, 6000, 9000, dan 12000 lb/jam. Komposisi umpan metana divariasikan menjadi 85,78; 90; 95; dan 100 %mol. Selanjutnya, laju alir umpan dan konsumsi energi dari setiap peralatan akan diperoleh.

Metode

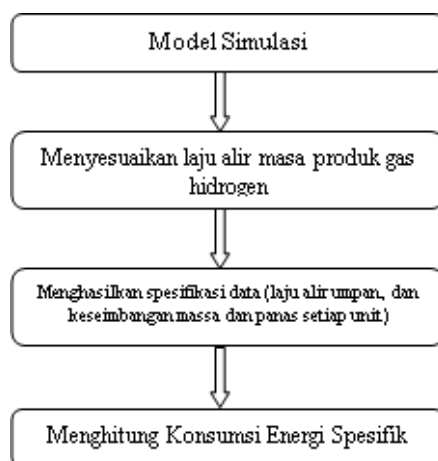
Untuk menyesuaikan kondisi proses pada industri yang sudah berjalan, maka dilakukan pengumpulan data sekunder dari berbagai industri amoniak. Hal ini karena proses produksi gas hidrogen merupakan bagian dari industri amoniak. Data untuk proses pemurnian gas hidrogen menggunakan larutan amina didapatkan dari sumber literatur Dubois & Thomas (2011) dan Øi *et al.* (2014). Data-data ini kemudian digunakan untuk membuat simulasi proses produksi gas hidrogen. Tahapan proses simulasi dapat dilihat pada Gambar 1 (Sopurta dkk, 2014).



Gambar 1. Tahapan proses pembuatan model pada Aspen HYSYS

Fluid Package yang dipilih untuk model yaitu Peng-Robinson, umumnya digunakan untuk analisis termodinamika campuran polar dan non-polar, hidrokarbon, dan gas-gas ringan, dan semua perhitungan mengasumsikan hukum gas ideal. Penggunaan Peng-Robinson sangat direkomendasikan untuk diaplikasikan pada proses pengolahan minyak, gas, dan petrokimia (Yusuf dkk., 2015).

Proses ini melibatkan keseimbangan massa dan keseimbangan panas yang dihasilkan dari simulasi, sehingga memperoleh konsumsi energi dari setiap peralatan. Analisis konsumsi energi diperlukan untuk menghitung konsumsi energi spesifik berdasarkan laju produksi gas hidrogen. Langkah-langkah untuk melakukan simulasi guna memperoleh konsumsi energi dari setiap peralatan diilustrasikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan dalam menghitung konsumsi energi spesifik

Menurut Troyan (1982), dalam mengestimasi konsumsi energi spesifik, perhitungan dilakukan menggunakan persamaan (4).

$$Ep = \Sigma Q_u F_u + \Sigma Q_m F_m \dots (4)$$

Dengan:

E_p : Jumlah energi suatu produk (10^6 Btu)

Q_u : Jumlah Produk dari utilitas umum (steam, listrik, air)

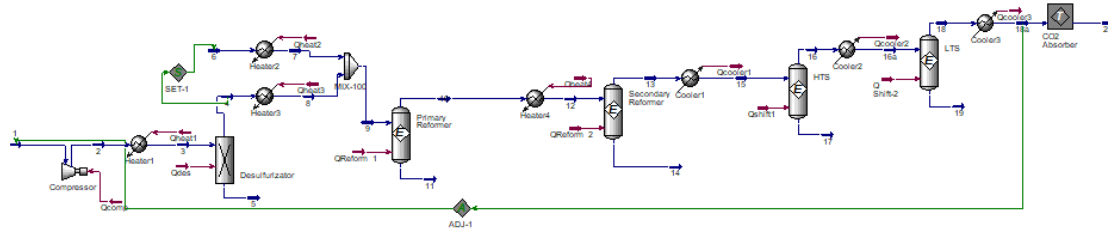
Q_m : Jumlah produk dari bahan energi (minyak, gas, batubara)

F_u : Konsumsi Energi Spesifik dari utilitas umum (10^6 Btu/unit)

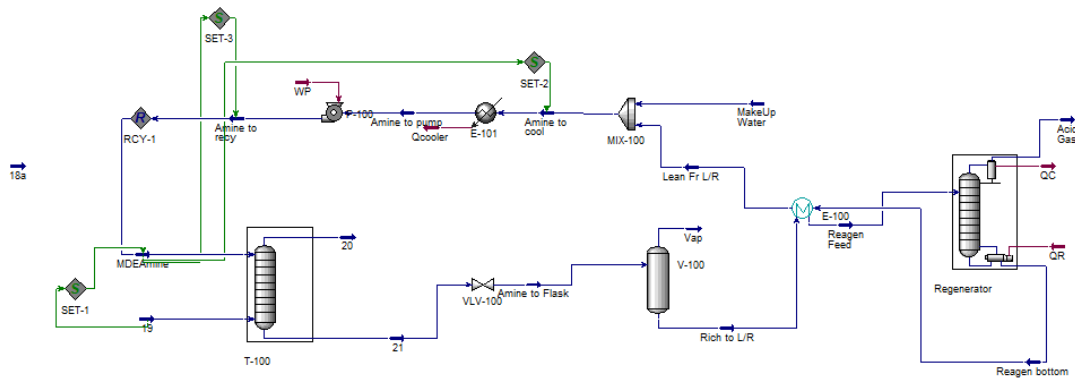
F_m : Konsumsi Energi Spesifik dari bahan energi (10^6 Btu/unit)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan industri amoniak yang sudah berjalan, maka dibuat diagram alir proses menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS V12.1 dan dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar 4 menggambarkan proses pemurnian CO_2 dalam *steam reforming* menggunakan larutan amina. Teknologi ini dipilih karena berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Dubois & Thomas (2011), jika kandungan CO_2 sebagai umpan diantara 4-18%, dapat menggunakan larutan amina untuk pemurnian CO_2 .



Gambar 3. Model reaksi *steam reforming*



Gambar 4. Model proses pemurnian CO₂ pada reaksi *steam reforming*

Kondisi operasi yang digunakan dalam membuat model pada Aspen HYSYS disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi operasi pada reaksi *steam reforming*

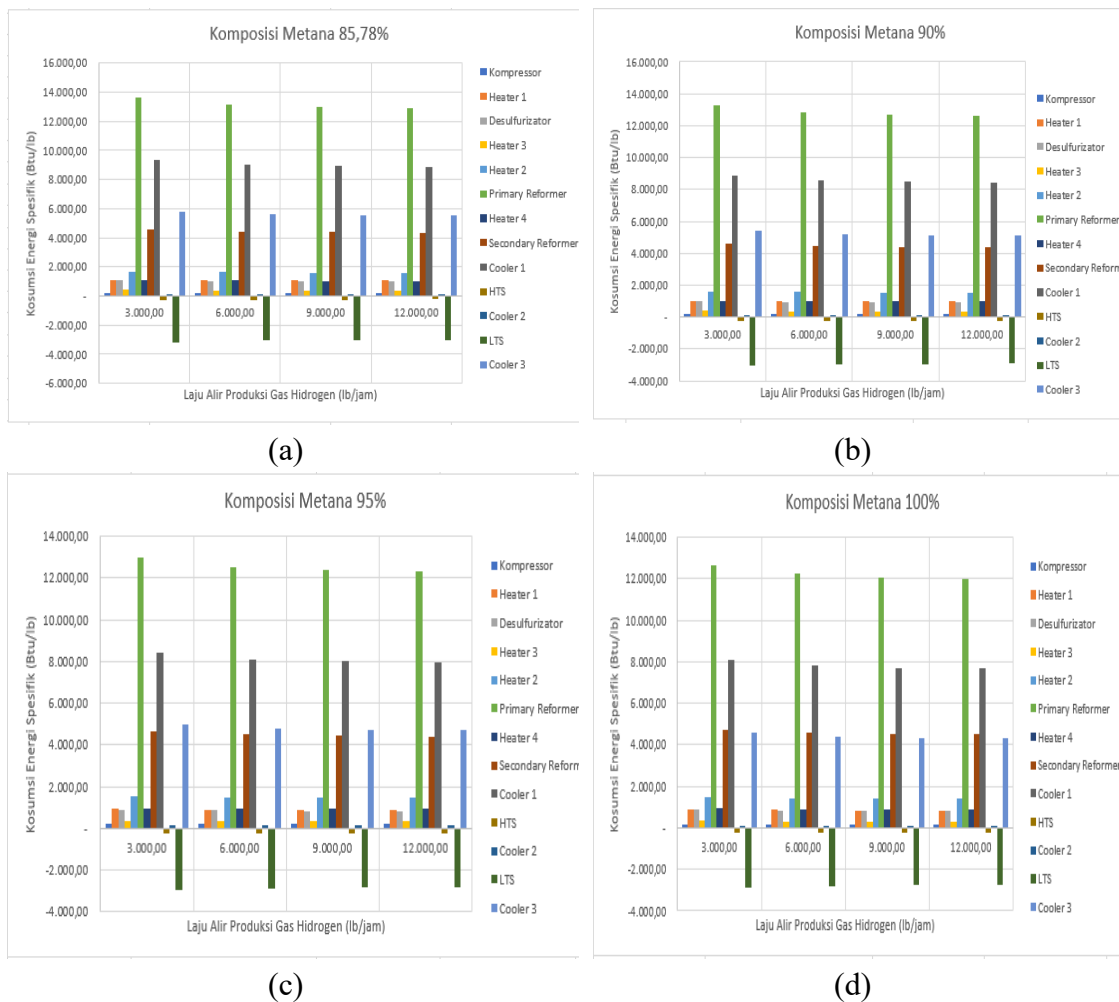
No	Unit Operasi	Kondisi Operasi			
		Temp (°F)	Temp (°C)	P (psia)	P (atm)
1	Kompresor	208	98	650	44
2	Heater 1	750	399	640	43,5
3	Desulfurizator	1150	621	577,5	39,3
4	Heater 3	1292	700	567,5	38,6
5	Heater 2	833	445	490	33,3
6	Primary Reformer	1521	827	490	33,3
7	Heater 4	1652	900	480	32,6
8	Secondary reformer	1841	1005	480	32,6
9	Cooler 1	700	371	470	32
10	HTS	817	436	470	32
11	Cooler 2	799	426	460	31,3
12	LTS	441	227	460	31,3
13	Cooler 3	158	70	450	30,6

Sebelum reaksi *steam reforming*, diperlukan proses desulfurisasi pada umpan gas agar kandungan sulfur (S) yang masuk ke *primary reformer* mempunyai kadar <0,5 ppm. *Primary reformer* melibatkan reaksi kimia gas alam yang melewati katalis, dengan penambahan uap, menghasilkan hidrogen, CO, dan CO₂. *Primary reformer* dilakukan dalam tungku untuk mengakomodasi beban panas yang tinggi. Steam umpan yang digunakan memiliki rasio 3:1 terhadap umpan gas. *Secondary reformer* adalah bejana tekan dengan lapisan tahan api, dan panas yang diperlukan untuk unit ini diperoleh dengan membakar gas dan udara eksternal, yang juga menyediakan N₂ untuk produksi amonia. *Primary Reformer* menggunakan bahan bakar gas alam, sehingga gas yang keluar dari unit ini memiliki suhu 1521°F. Karena reaksi dalam *secondary reformer* bersifat endotermik, gas akan keluar dari unit ini pada suhu 1841°F. Aliran gas proses dari *secondary reformer* pada suhu 700°F memasuki unit pemurnian, yaitu *High Temperature Shift* (HTS). Reaksi di sini bersifat eksotermik, dan suhu gas proses keluar adalah sekitar 817°F. Kemudian aliran memasuki unit *Low Temperature Shift* (LTS) pada suhu yang lebih rendah yaitu 441°F. Penghilangan CO₂ melibatkan eliminasi CO₂ dari gas proses. CO₂ dapat menyebabkan korosi pada peralatan proses, sehingga kandungan CO₂ harus dikendalikan antara 0,05% - 0,1%. Di unit penghilangan CO₂, larutan amina digunakan sebagai penyerap karena kandungan CO₂ dalam gas sintesis yang dihasilkan adalah <60%.

Tabel 2. Konsumsi energi spesifik pada reaksi *steam reforming*

No	Komposisi umpan metana (%mol)	Laju Alir Umpan (lb/jam)	Laju Alir Produksi Gas H ₂ (lb/jam)	Total Konsumsi Energi (Btu/jam)	Konsumsi Energi Spesifik (10 ⁵ Btu/lb)
1	85,78	9.500,58	3000	106.855.833,08	0,356
		18.350,36	6000	206.391.951,60	0,343
		27.202,81	9000	305.958.498,75	0,339
		36.052,59	12000	405.494.757,10	0,337
2	90	8.563,41	3000	102.672.208,10	0,342
		16.534,50	6000	198.242.553,51	0,330
		24.506,85	9000	293.828.138,97	0,326
		32.479,21	12000	389.413.724,42	0,324
3	95	7.774,07	3000	98.389.852,28	0,327
		15.006,77	6000	189.927.862,91	0,316
		22.238,48	9000	281.453.522,32	0,312
		29.469,96	12000	372.979.181,73	0,310
4	100	6.833,62	3000	95.185.487,38	0,317
		13.192,98	6000	183.764.901,07	0,306
		19.552,11	9000	272.341.126,50	0,302
		25.910,32	12000	360.904.598,90	0,300

Tabel 2 menunjukkan nilai konsumsi energi spesifik untuk variasi komposisi umpan metana: 85,78, 90, 95, dan 100 %mol. Konsumsi energi spesifik terendah terjadi pada komposisi metana 100% dengan nilai 0,30 – 0,317 (10^5 Btu/lb). Hal ini dipengaruhi oleh komposisi CO₂ dalam gas umpan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Yusuf dkk. (2015), penambahan CO₂ ke gas umpan meningkatkan konsumsi energi. Untuk komposisi metana sebesar 85,78, 90, dan 95 %mol, kandungan CO₂-nya adalah 5%, sedangkan untuk metana 100 %mol, tidak ada kandungan CO₂. Studi Yusuf dkk. (2015) menunjukkan bahwa peningkatan CO₂ pada umpan menyebabkan jumlah CO yang lebih tinggi dalam hasil *steam reforming* menuju Shift Temperatur Tinggi (HTS) karena peningkatan suhu *bed* katalis.



Gambar 5. Konsumsi energi spesifik per unit proses untuk variasi komposisi (a) 85,78; (b) 90; (c) 95 dan (d) 100% metana pada gas umpan.

Konsumsi energi spesifik didapatkan dari total konsumsi energi pada setiap unit operasi. Konsumsi energi berasal dari berbagai macam sumber energi seperti listrik, gas alam, bahan bakar minyak, batubara, *steam*, dll. (Sommerfeld & White, 1982). Pada

penelitian sebelumnya, konsumsi energi dihitung secara keseluruhan pada reaksi *steam reforming*. Hasil penelitian ini menunjukkan konsumsi energi spesifik untuk setiap unit proses yang terlibat. Untuk berbagai variasi komposisi metana, pada laju alir produksi gas hidrogen yang sama, konsumsi energi spesifik terbesar terjadi pada unit *primary reformer*. Begitupun juga untuk berbagai variasi laju alir produksi gas hidrogen seperti yang disajikan pada Gambar 5. Komposisi metana 85,78% pada gas umpan memiliki konsumsi energi spesifik tertinggi, yaitu 35000 Btu/lb. Dari nilai tersebut, unit *primary reformer* menyumbang paling besar yaitu 13600 Btu/lb atau sekitar 38% nya. Pada unit ini terjadi proses utama *steam reforming* yang berlangsung sangat endotermik. Reaksi endotermik adalah reaksi yang memerlukan panas untuk menjalankan proses. Dapat dilihat pada tabel 1, terjadi kenaikan suhu yang signifikan pada unit *primary reformer* yaitu 688°F.

Data dan hasil penelitian yang telah dilakukan diharapkan dapat memberikan wawasan dan rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya energi dalam produksi hidrogen.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan bahwa konsumsi energi spesifik terkecil terjadi pada komposisi metana 100% pada umpan, karena tidak terdapat kandungan CO₂. Selain itu, konsumsi energi spesifik terbesar terjadi pada variasi komposisi metana 85,78% dengan laju alir produksi gas hidrogen 3000 lb/jam yaitu 0,356 105 btu/lb dan konsumsi energi spesifik terbesar terjadi pada unit primary reformer yang mencapai 38% dari konsumsi energi spesifik total unit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Prof. Ir. Abdul Wahid, M.T., PhD selaku kepala laboratorium rekayasa sistem proses yang telah memberikan fasilitas untuk menggunakan software Aspen HYSYS.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimah, S. & Dewita, E., 2008. Pemilihan teknologi produksi hidrogen dengan memanfaatkan energi nuklir. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 10(2): 123-132
- Chen, W.H., Chen, W.H., Chein, R.Y., Hoang, A.T., Manatura, K. & Naqvi, S.R. 2023. Optimization of hydrogen purification via vacuum pressure swing adsorption. *Energy Conversion and Management*: X. 20: 100459.
- Di Nardo, A., Portarapillo, M., Russo, D. & Di Benedetto, A. 2024. Hydrogen production via *steam reforming* of different fuels: thermodynamic comparison. *International Journal of Hydrogen Energy*. 55: 1143-1160.
- Dubois, L. & Thomas, D., 2011. Carbon dioxide absorption into aqueous amine-based solvents: modeling and absorption tests. *Energy Procedia*. 4: 1353-1360.

- Firmansyah, M.R. & Silviyati, I., 2020. Simulasi produksi gas sintesa melalui proses *biogas steam reforming* dengan katalis Ni/MgO-Al₂O₃ dan Ni/La₂O₃-Al₂O₃. *Kinetika*. 11(2): 55-59.
- IEA (International Energy Agency). 2022. *World Energy Outlook 2022*. International Energy Agency. Paris.
- KESDM (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral). 2024. Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2023. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Jakarta.
- Øi, L.E., Bråthen, T., Berg, C., Brekne, S.K., Flatin, M., Johnsen, R., Moen, I.G. & Thomassen, E. 2014. Optimization of configurations for amine-based CO₂ absorption using Aspen HYSYS. *Energy Procedia*. 51: 224-233.
- Oni, A.O., Anaya, K., Giwa, T., Di Lullo, G. & Kumar, A. 2022. Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*. 254: 115245.
- Sommerfeld, J.T. & White, R.H. 1982. Estimate Energy Consumption from Heat Reaction. In: *Process Energy Conservation*. McGraw-Hill Publications Co. New York.
- Song, C., Liu, Q., Ji, N., Kansha, Y. & Tsutsumi, A. 2015. Optimization of steam methane reforming coupled with pressure swing adsorption hydrogen production process by heat integration. *Applied Energy*. 154: 392-401.
- Sopurta, A., Siregar, P. & Ekawati, E. 2015. Perancangan sistem simulasi HYSYS & integrasi dengan programmable logic controller-human machine interface: studi kasus pada plant kolom distilasi etanol-air. *Jurnal Otomasi, Kontrol & Instrumentasi*. 6(1): 1-9.
- Troyan, J.E. 1982. Energy Conservation Programs Require Accurate Records. In: *Process Energy Conservation*. McGraw-Hill Publications Co. New York.
- Welaya, Y.M., El Gohary, M.M. & Ammar, N.R. 2012. Steam and partial oxidation reforming options for hydrogen production from fossil fuels for PEM fuel cells. *Alexandria Engineering Journal*. 51(2): 69-75.
- Yusuf, J., Husin, H. & Marwan, M. 2015. Simulasi pengaruh kandungan CO₂ dalam gas umpan terhadap *reforming* dan *shift converter* sistem pabrik amoniak. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*. 10(4): 178-187.