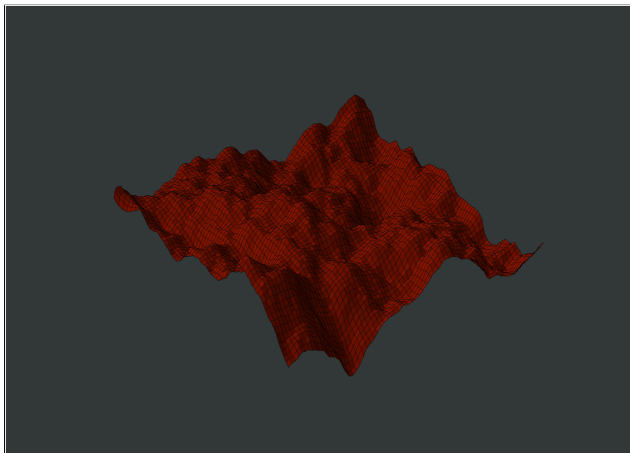




ARTIKEL PENELITIAN

Simulasi proses metanasi pada *Power-to-Gas* (PtG) dengan model TREMPBudi H. Bisowarno^{1,*} and Samuel Billy B.¹¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, 40142, Indonesia

Disubmit 24 Maret 2022; direvisi 22 September 2022; diterima 09 Oktober 2022



OBJECTIVES Increasing greenhouse gas emissions produced by human activities have caused global warming at an increasing rate every year. The utilization of renewable power plants like wind and solar energy is also still not optimum because of the fluctuations in the energy produced and limited energy storage. The power-to-gas process can be an alternative for storing electrical energy in other forms. The process includes the electrolysis of water to produce hydrogen and reacting it with greenhouse gas emissions, namely carbon dioxide, to form methane which can be stored in the existing well-established natural gas distribution grid. The application of this process has its challenges in having flexibility against fluctuations in hydrogen gas resulting from the electrolysis process. This study aims to determine the effect of variations in operating conditions and process modifications at the methanation stage of the power-to-gas process with the TREMP model on the maximum reactor temperature and the acquisition of methane composition in the resulting SNG gas. **METHODS** The exothermic methanation reaction and fluctuating hydrogen gas feed can cause *thermal runaway* when the feed concentration increases. The process simulation uses ASPEN Plus software with sensitivity analysis to determine the conditions and process modifications that can accommodate fluctuations in the hydrogen gas feed rate. **RESULTS** Based on the simulation using ASPEN Plus, the excess feed of carbon dioxide was chosen because the acceptable range of feed ratio was wider (0.25 – 0.5). To increase feed flexibility, this TREMP with excess carbon dioxide can use a configuration of 3 (three) reactors arranged in series. **CONCLUSIONS** The absorption column can separate excess carbon dioxide

from the product stream and produce standard SNG gas (94% methane composition).

KEYWORDS feedstock flexibility; methanation; power-to-gas; synthetic natural gas; TREMP

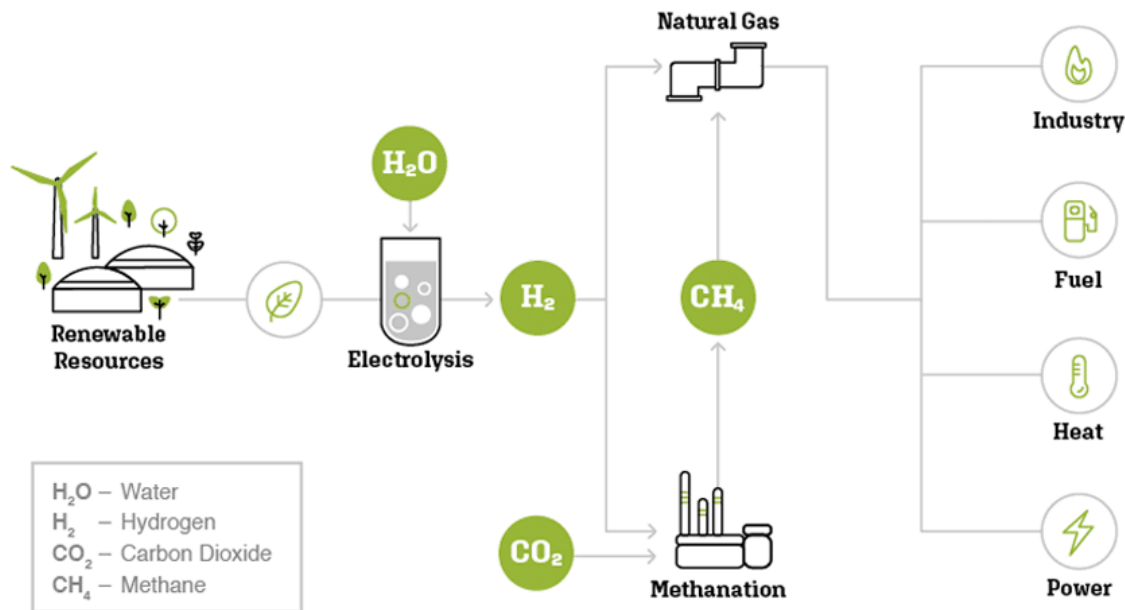
TUJUAN Peningkatan emisi gas rumah kaca telah menyebabkan pemanasan global dengan laju yang semakin cepat setiap tahunnya. Sementara itu, pemanfaatan pembangkit listrik terbarukan seperti dari tenaga angin dan tenaga surya mempunyai masalah akibat fluktuasi energi yang dihasilkan dan penyimpanan energi yang terbatas. Proses *power-to-gas* (PtG) dapat menjadi solusi alternatif untuk menyimpan energi listrik melalui proses elektrolisis air yang menghasilkan gas hidrogen dan mereaksikannya dengan emisi gas rumah kaca, yaitu gas karbon dioksida untuk menghasilkan gas metana. Gas metana selanjutnya dapat disimpan dalam infrastruktur gas alam. Fleksibilitas penerapan proses (PtG) ini memiliki tantangan tersendiri karena fluktuasi gas hidrogen hasil proses elektrolisis. Makalah ini mendiskusikan pengaruh variasi kondisi operasi dan modifikasi proses pada tahap metanasi proses PtG terhadap temperatur maksimum reaktor dan perolehan komposisi metana pada gas *synthetic natural gas* (SNG). **METODE** Tahap metanasi dimodelkan dengan *Topsoe's Recycle Energy efficient Methanation Process* (TREMP). Reaksi eksotermis dapat menyebabkan *thermal runaway* dengan peningkatan konsentrasi umpan akibat fluktuasi gas hidrogen. **HASIL** Berdasarkan simulasi menggunakan ASPEN Plus, umpan karbon dioksida berlebih dipilih karena rentang perubahan rasio umpan lebih lebar (0,25 – 0,5). Untuk meningkatkan fleksibilitas umpan, TREMP dengan karbon dioksida berlebih ini dapat menggunakan konfigurasi 3 (tiga) reaktor yang disusun secara seri. **KESIMPULAN** Kolom absorpsi dapat digunakan untuk pemisahan karbon dioksida berlebih dari aliran produknya dan menghasilkan gas SNG standar (94%).

KATA KUNCI fleksibilitas umpan; metanasi; *power to gas*; *synthetic natural gas*; TREMP

1. PENDAHULUAN

Pengurangan emisi gas rumah kaca merupakan salah satu tantangan bersama dalam beberapa dekade ke depan untuk mengurangi pemanasan global dan konsekuensinya terhadap perubahan iklim. Sebagian besar sumber emisi gas ru-

*Korespondensi: budih@unpar.ac.id



GAMBAR 1. Skema *power-to-gas* (PtG).

mah kaca ini berasal dari hasil pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan sebagai sumber listrik, panas, dan transportasi. Pada tahun 2016, sebesar 24,2 % emisi gas rumah kaca dunia dihasilkan dari hasil pembakaran bahan bakar fosil di industri yang dikonversi menjadi energi dan produk reaksi kimia tertentu (Ritchie dkk. 2020). Oleh sebab itu, sumber energi alternatif nonfosil diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi di suatu industri.

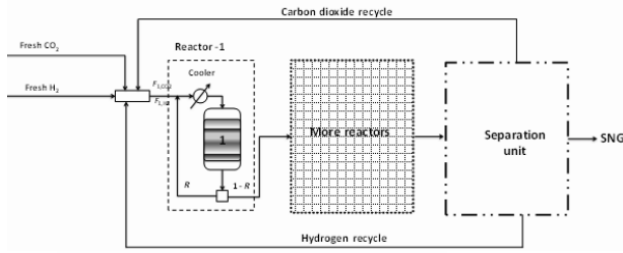
Energi terbarukan seperti energi surya dan angin menghasilkan energi listrik yang berfluktuasi bahkan terputus-putus dan harus diseimbangkan untuk tujuan stabilitas pada jaringan listrik. Oleh sebab itu, penyimpanan energi listrik jangka panjang dengan kapasitas yang besar diperlukan sebagai cadangan kapasitas produksi. Proses *power to gas* (PtG) dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan ini dengan menghubungkan jaringan energi listrik dengan jaringan gas alam lewat konversi energi listrik menjadi *substitute natural gas* (SNG) seperti gas metana. Proses ini dilakukan melalui dua tahap, elektrolisis air dan konversi gas hidrogen dengan sumber karbon menjadi gas metana lewat proses metanasi. Gas metana yang terbentuk ini dapat didistribusikan ke dalam jaringan gas alam.

Tantangan utama proses PtG ini adalah bagaimana keseluruhan proses seperti skema pada Gambar 1 dapat memiliki fleksibilitas dan aman terhadap fluktuasi sumber listrik dari energi terbarukan untuk menghasilkan gas metana sesuai standar. Sumber listrik yang berasal dari pembangkit listrik tenaga angin dan energi surya diumpungkan ke proses elektrolisis air menghasilkan gas hidrogen. Gas hidrogen lalu dapat diumpungkan langsung ke jaringan distribusi gas atau diumpungkan ke proses metanasi menghasilkan gas metana. Pengolahan lebih lanjut menjadi gas metana lebih ideal karena jumlah gas hidrogen dibatasi pada jaringan distribusi gas yang cukup berbahaya (Götz dkk. 2016). Sumber karbon untuk proses metanasi dapat diperoleh dari gasifika-

si batubara atau batubara lignit (Sobah dkk. 2013; Tristantini dkk. 2016; Songolzadeh dkk. 2014) dan biomassa (Slivka dkk. 2011). Sumber karbon juga dapat berasal dari proses industri yang menghasilkan gas karbon dioksida dengan konsentrasi tinggi seperti pembangkit listrik, industri baja, industri semen, dan kilang minyak (Balan dkk. 2016; Held dkk. 2020). Berbagai jenis metode elektrolisis air yang memiliki tingkat fleksibilitas yang baik terhadap umpan energi listrik telah dijelaskan pada literatur lain (Götz dkk. 2016) dan fokus pada penelitian ini ditujukan pada peninjauan fleksibilitas pada tahap metanasi proses *power-to-gas*.

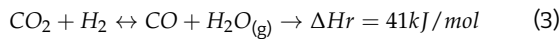
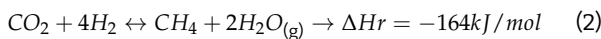
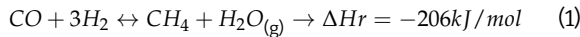
Reaksi eksotermis pada tahap metanasi sebagai inti dari proses PtG dapat menghasilkan peningkatan temperatur yang signifikan, sehingga diperlukan modifikasi dan pengendalian sistem proses yang tepat. Model proses yang dapat digunakan dalam tahap metanasi untuk menghasilkan SNG adalah model TREMP (*Topsoe's Recycle Energy efficient Methanation Process*), seperti ditunjukkan pada Gambar 2 (Balan dkk. 2016; Halder Topsøe 2009). Reaktor adiabatik disusun secara seri dan *recycle* pada produk keluaran reaktor pertama digunakan untuk mengurangi konsentrasi reaktan. Kondisi operasi seperti temperatur awal dan tekanan sistem juga dapat berpengaruh terhadap kesetimbangan reaksi yang mengubah laju peningkatan temperatur dalam reaktor.

Reaksi metanasi CO dan CO₂ pertama kali ditemukan pada tahun 1902 oleh Sabatier dan Senderens (Rönsch dkk. 2016). Reaksi metanasi CO dan CO₂ yang disebut sebagai Reaksi Sabatier ditunjukkan pada persamaan 1 dan 2. Kedua reaksi merupakan reaksi reversibel yang bersifat eksotermis. Reaksi *reverse water gas shift* (RWGS) juga dapat terjadi secara simultan ketika menggunakan katalis aktif yang ditunjukkan pada persamaan 3. Review kinerja aneka katalis pada berbagai kondisi operasi sudah dilakukan dan diperoleh kesimpulan bahwa katalis nikel merupakan katalis yang memiliki tingkat selektivitas paling tinggi dan aktivitas yang baik



GAMBAR 2. Skema Topsoe's recycle energy efficient methanation process (Balan dkk. 2016).

(Lee dkk. 2021; Hu dkk. 2012).



Salah satu tantangan dalam proses PtG ini adalah bagaimana sistem memiliki fleksibilitas terhadap fluktuasi sumber energi listrik. Hal ini menyebabkan fluktuasi produk gas hidrogen dari proses elektrolisis air yang berbahaya apabila diumpangkan ke proses metanasi. Proses metanasi dapat menjadi tidak stabil dan reaksi metanasi yang bersifat eksotermis dapat mengakibatkan *thermal runaway* apabila temperatur tidak dapat dikontrol dengan baik. Pada proses metanasi dengan katalis, kenaikan temperatur yang berlebihan dapat menyebabkan katalis tersinter dan terdeaktivasi. Oleh sebab itu, desain proses metanasi yang memiliki fleksibilitas terhadap perubahan komposisi umpan (*feedstock flexibility*) diperlukan untuk memastikan temperatur maksimum reaktor pada 850 K dan tidak terjadi peristiwa *thermal runaway* dan menghasilkan produk gas SNG dengan komposisi gas metana yang sesuai standar, yaitu minimum 94% (Jeong dkk. 2021).

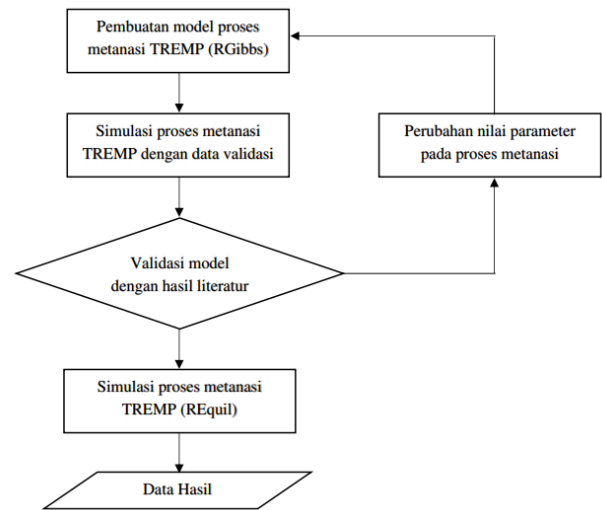
Penelitian ini bertujuan mensimulasikan tahap metanasi pada proses PtG dengan perubahan komposisi umpan (rasio mol umpan) menggunakan model reaktor REquil pada simulator ASPEN Plus (Murena 2020). Analisa sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh modifikasi proses, yaitu penambahan *recycle* pada produk keluaran reaktor pertama dan pengaruh kondisi proses terhadap temperatur maksimum reaktor dan perolehan akhir gas SNG akibat fluktuasi gas hidrogen yang diumpangkan ke reaktor.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kering menggunakan perangkat lunak komputasi proses, Aspen Plus V11 (lisensi akademik Universitas Katolik Parahyangan). Untuk proses simulasi model TREMP, maka dipilih alat dan bahan penelitian serta cara penelitian sebagai berikut.

2.1 Alat dan bahan penelitian

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak Aspen Plus V11 (lisensi akademik Universitas Katolik Parahyangan). Kompo-



GAMBAR 3. Diagram alir prosedur penelitian.

nen yang digunakan adalah hidrogen, karbon dioksida, karbon monoksida, metana, dan air yang diambil dari *database* ASPEN.

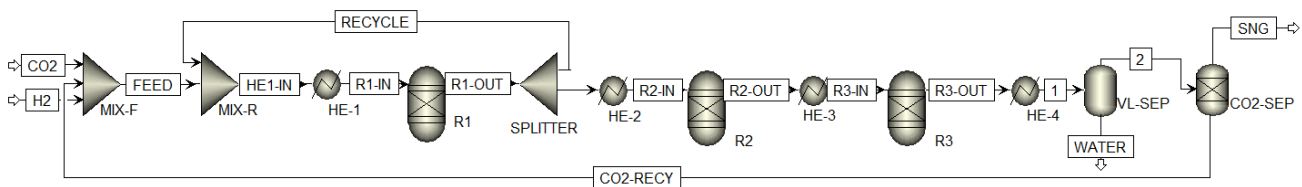
2.2 Prosedur penelitian

Prosedur penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3. Proses metanasi menggunakan model TREMP dengan umpan gas karbon dioksida dan gas hidrogen dimodelkan dengan bantuan ASPEN Plus berdasarkan deskripsi proses pada Gambar 2. Spesifikasi umpan dan kondisi proses metanasi menggunakan data dari penelitian oleh Balan dkk. (2016). Model TREMP yang dijadikan dasar untuk simulasi disajikan pada Gambar 4.

Reaktor metanasi dimodelkan menggunakan model reaktor REquil sehingga reaksi diasumsikan berlangsung secara ideal dengan menghitung kesetimbangan fasa dan kimia berdasarkan stoikiometrik dari reaksi yang berlangsung menggunakan data ASPEN Plus. Data spesifikasi umpan karbon dioksida murni dan hidrogen murni dapat dilihat pada Tabel 1. Karena reaksi metanasi merupakan reaksi eksotermis, maka keluaran reaktor pertama dikembalikan sebagai umpan reaktor menggunakan *splitter* dan *mixer*. Dengan demikian, konsentrasi gas karbon dioksida dan gas hidrogen di umpan akan berkurang untuk mengurangi peningkatan temperatur dalam reaktor. Alat penukar panas yang digunakan untuk mengatur temperatur umpan masukan reaktor dan mendinginkan campuran gas di tiap keluaran reaktor menggunakan penukar panas HEATER pada ASPEN Plus. Temperatur awal umpan masuk tiap reaktor dijaga tetap pada 573 K dengan penukar panas. Jumlah reaktor yang dibutuhkan untuk proses metanasi ini bergantung pada variasi *feed ratio*, rasio *recycle*, dan standar komposisi metana pada gas SNG yang ingin dicapai. Secara umum, kandungan metana pada gas alam adalah sekitar 94 %.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan dan simulasi proses metanasi pada model TREMP menggunakan ASPEN Plus dilakukan untuk meninjau kondisi proses dan modifikasi proses untuk mengakomodasi fluktuasi gas hidrogen yang diumpangkan ke reaktor. Temperatur reaktor harus tetap berada dalam



GAMBAR 4. Model TREMP dalam ASPEN Plus.

TABEL 1. Spesifikasi umpan .

Komponen	Laju alir (kmol/h)	Tekanan (bar)	Temperatur Umpan (K)
CO ₂	(d disesuaikan dengan variasi feed ratio)	30	303
H ₂	54		

batas temperatur aman untuk katalis nikel (573-850 K) dan perolehan akhir gas SNG memenuhi standar yang ditetapkan (94%).

3.1 Validasi model

Pada tahap validasi, simulasi dilakukan pada reaktor pertama model TREMP menggunakan umpan murni H₂ sebesar 54 kmol/jam dan bervariasi laju umpan CO₂ murni untuk mendapatkan rasio umpan 0,035 – 0,5. Temperatur umpan masuk ke reaktor pertama adalah 573 K dan tekanan reaktor sebesar 30 bar. Pengaruh rasio umpan (F_{CO_2}/F_{H_2}) pada berbagai harga rasio recycle (R) untuk mendapatkan temperatur maksimum pada reaktor pertama dibandingkan dengan data literatur (Balán dkk. 2016) dan ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil simulasi ini sudah sesuai dengan data literatur sehingga model proses yang dikembangkan dapat digunakan untuk simulasi proses selanjutnya.

3.2 Penentuan rasio recycle minimum

Rasio recycle minimum pada reaktor pertama selanjutnya ditentukan untuk mengetahui nilai rasio recycle terkecil yang diperlukan untuk menghasilkan temperatur maksimum keluaran reaktor dibawah batas temperatur maksimum katalis di seluruh variasi rasio umpan. Rasio recycle minimum ini diperlukan supaya tahap metanasi pada proses *power-to-gas* memiliki *feedstock flexibility* yang baik sehingga katalis tidak

rusak akibat fluktuasi gas hidrogen dari proses elektrolisis air.

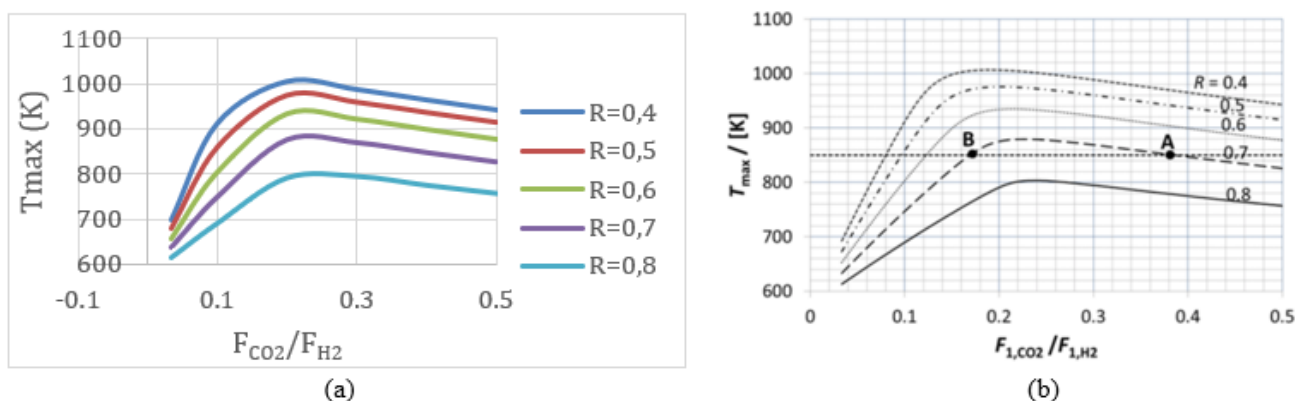
Batas temperatur maksimum pada reaktor pertama sebesar 850 K (Balán dkk. 2016). Berdasarkan Gambar 5, rasio recycle divariasikan dengan analisa sensitivitas pada rentang 0,7 – 0,8 dan menghasilkan rasio recycle minimum pada R = 0,74. Pada rasio recycle minimum ini, profil temperatur maksimum pada reaktor pertama pada berbagai rasio umpan ditunjukkan pada Gambar 6.

Penggunaan rasio recycle minimum pada proses ini hanya ditujukan untuk menjaga keamanan proses dari fluktuasi rasio umpan dan reaksi yang bersifat eksotermis di tahap metanasi proses *power-to-gas* ini. Terkait dengan performa reaktor untuk mengkonversi reaktan menjadi produk, peningkatan temperatur yang signifikan dari 573 K ke 850 K kurang baik untuk reaksi metanasi yang bersifat eksotermis. Hal ini disebabkan tingginya kenaikan temperatur akan mulai menggeser kesetimbangan reaksi ke arah reaktan dan reaksi RWGS pun mulai terbentuk.

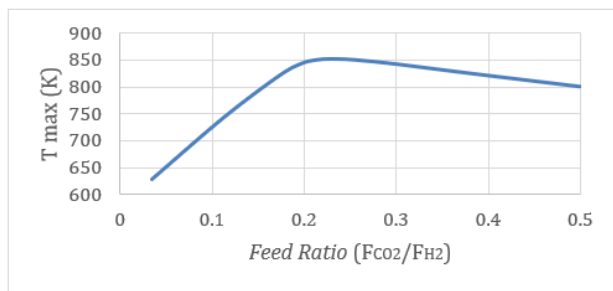
3.3 Pemilihan temperatur dan tekanan reaktor

Pemilihan kondisi temperatur reaksi ditentukan oleh batas rentang operasi katalis nikel. Batas temperatur minimum adalah 573 K, dimana reaksi gas-padatan pada katalis nikel dapat membentuk padatan karbon pada permukaan katalis jika temperatur reaksi lebih rendah dari batas temperatur minimum. Sementara itu, batas temperatur maksimum adalah 850 K untuk menghindari katalis tersinter.

Pada simulasi proses ini, umpan masuk reaktor pertama sudah diatur pada batas temperatur minimum dengan menggunakan penukar panas. Peningkatan nilai temperatur umpan ke tiap reaktor bertentangan dengan kondisi ideal untuk reaksi eksotermis, yang membutuhkan kondisi temperatur rendah dan tekanan tinggi untuk menggeser kesetimbangan ke arah produk. Karenanya, rasio recycle diperluk-



GAMBAR 5. Pengaruh rasio umpan (F_{CO_2}/F_{H_2}) dan rasio recycle (R) terhadap temperatur maksimum reaktor pertama, hasil simulasi (a) dan data literatur (b).



GAMBAR 6. Profil temperatur maksimum reaktor pertama pada berbagai rasio umpan ($R = 0,74$).

TABEL 2. Komposisi metana pada gas SNG pada berbagai rasio umpan .

(a) Konfigurasi 1 Reaktor			
F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)	F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)
0,1	99,33	0,18	99,14
0,12	99,48	0,20	96,9
0,14	99,58	0,21	94,79
0,16	99,58	0,22	92,26
(b) Konfigurasi 2 Reaktor			
F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)	F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)
0,22	99,8	0,25	94,26
0,23	99,28	0,26	82,61
0,24	97,15		
(c) Konfigurasi 3 Reaktor			
F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)	F_{CO_2}/F_{H_2}	CH_4 SNG (%)
0,25	95,12	0,38	97,72
0,28	97,1	0,42	97,78
0,32	97,51	0,46	97,81
0,36	97,67	0,5	97,83

an untuk menurunkan konsentrasi reaktan agar peningkatan temperatur selama reaksi dalam reaktor tidak signifikan.

Sementara itu, pengaruh tekanan dipelajari dengan memberikan variasi tekanan pada rentang 10 – 30 bar. Tekanan operasi lebih rendah dipelajari untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kondisi operasi reaktor. Reaksi fasa gas menjadi batas terendah pemilihan tekanan operasi minimum, yaitu 10 bar. Berdasarkan hasil simulasi, penurunan tekanan tidak terlalu mempengaruhi perubahan temperatur maksimum reaktor dan hanya menurunkan sekitar 2% komposisi produk metana. Akan tetapi, perubahan tekanan ini mempengaruhi laju volumetrik baik umpan maupun produk yang berfasa gas. Volume yang diperlukan untuk mengalirkan laju massa yang sama akan lebih besar dan dengan demikian memerlukan reaktor dengan ukuran yang lebih besar juga.

3.4 Jumlah reaktor

Pada dasarnya jumlah reaktor yang diperlukan pada tiap variasi rasio umpan berbeda-beda untuk mencapai target komposisi gas SNG ($\geq 94\%$). Model TREMP dengan rangkaian seri reaktor ditunjukkan pada Gambar 4. Pada rasio recycle minimum ($R = 0,74$), Tabel 2 (a) menunjukkan komposisi gas SNG pada berbagai variasi rasio umpan dengan penggunaan satu reaktor. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio umpan (F_{CO_2}/F_{H_2}) lebih besar dari 0,21 tidak dapat menghasilkan target komposisi gas SNG. Jumlah karbon dioksida lebih besar

membutuhkan tambahan reaktor untuk mengkonversi menjadi produk metana.

Reaktor kedua diperlukan untuk menghasilkan gas SNG di atas 94% pada rentang rasio umpan 0,22 – 0,25. Hasil simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 2 (b). Untuk rasio umpan lebih besar dari 0,25 membutuhkan reaktor ketiga supaya target komposisi gas SNG dapat dipenuhi.

Untuk rasio umpan yang lebih besar ($F_{CO_2}/F_{H_2} = 0,25 - 0,5$) dimana umpan CO_2 yang berlebih diperlukan skema tiga reaktor dirangkai seri dengan penggunaan cooler di antara reaktornya seperti hasil simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 2 (c). Dengan demikian, konfigurasi TREMP menggunakan tiga reaktor menghasilkan tingkat fleksibilitas umpan yang paling tinggi dengan rentang feed ratio sebesar 0,25 – 0,5.

4. KESIMPULAN

Tahap metanasi proses *power-to-gas* dengan menggunakan model TREMP merupakan sistem yang cukup kompleks, yang di dalamnya terdapat disturbance berupa rasio umpan yang fluktuatif, batasan kondisi operasi terkait penggunaan katalis nikel pada reaktor, dan standar produk gas SNG yang harus dipenuhi. Beberapa variabel proses seperti rasio recycle, kondisi operasi berupa temperatur dan tekanan, serta jumlah reaktor sudah didiskusikan untuk meningkatkan fleksibilitas umpan (*feedstock flexibility*) dari sistem ideal tersebut.

Setelah tahapan reaksi metanasi dengan model TREMP, proses separasi produk samping berupa air dan sisa reaktan yang bergantung pada reaktan mana yang dibuat berlebih harus dilakukan. Reaktan dibuat berlebih untuk meningkatkan konversi reaktan dan memudahkan proses pemurnian metana pada SNG. Pemilihan rasio umpan memerlukan penelitian lebih lanjut untuk optimasi ekonomi terkait proses reaksi dan seperasinya. Kebutuhan jumlah reaktor yang berbeda ini dapat dipertimbangkan dalam pemilihan reaktan berlebih. Berkenaan proses separasi, teknologi pemisahan gas karbon dioksida jauh lebih dikenal di industri saat ini seperti absorpsi dan desorpsi menggunakan senyawa etanol amina (Songolzadeh dkk. 2014). Sementara teknologi pemisahan gas hidrogen dengan kemurnian di atas 99 % dapat dicapai dengan menggunakan teknologi membran berbasis material paladium dan dilanjutkan dengan sistem *pressure swing absorption* (PSA), dua proses yang cenderung lebih rumit dan memerlukan biaya yang besar (Balan dkk. 2016).

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan yang menyediakan lisensi akademik ASPEN Plus.

DAFTAR PUSTAKA

- Balan OM, Buga MR, Bildea CS. 2016. Conceptual design, performance and economic evaluation of carbon dioxide methanation plant. *Revista de Chimie*. 67(11):2237 – 2242. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85024093042{8}partnerID=40{8}md5=cb373f4226c99bb871d9338bb87e559b>.
- Götz M, Lefebvre J, Mörs F, McDaniel Koch A, Graf F, Bajohr S, Reimert R, Kolb T. 2016. Renewable power-to-gas: A

- technological and economic review. *Renewable Energy*. 85:1371–1390. doi:10.1016/j.renene.2015.07.066.
- Halder Topsøe. 2009. From solid fuels to substitute natural gas (SNG) using TREMP. Technical Report, Halder Topsøe:8. <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/tremp-2009.pdf>.
- Held M, Schollenberger D, Sauersschell S, Bajohr S, Kolb T. 2020. Power to gas: CO2 methanation concepts for SNG production at the Engler-Bunte-Institut. *Chemie Ingenieur Technik*. 92(5):595–602. doi:10.1002/cite.201900181.
- Hu D, Gao J, Ping Y, Jia L, Gunawan P, Zhong Z, Xu G, Gu F, Su F. 2012. Enhanced investigation of CO methanation over Ni/Al₂O₃ catalysts for synthetic natural gas production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 51(13):4875–4886. doi:10.1021/ie300049f.
- Jeong Y, Park J, Han M. 2021. Design and control of a fixed-bed recycle reactor with mult catalyst layers: methanation of carbon dioxide. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 60(12):4650–4667. doi:10.1021/acs.iecr.0c05784.
- Lee WJ, Li C, Prajitno H, Yoo J, Patel J, Yang Y, Lim S. 2021. Recent trend in thermal catalytic low temperature CO₂ methanation: A critical review. *Catalysis Today*. 368:2–19. doi:10.1016/j.cattod.2020.02.017.
- Murena F. 2020. Synthesis gas methanation and its modeling by aspen plus software università degli studi di napoli federico II faculty of engineering. (July).
- Ritchie H, Roser M, Rosado P. 2020. CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*.
- Rönsch S, Schneider J, Matthischke S, Schlüter M, Götz M, LeFebvre J, Prabhakaran P, Bajohr S. 2016. Review on methanation – From fundamentals to current projects. *Fuel*. 166:276–296. doi:10.1016/j.fuel.2015.10.111.
- Slivka RM, Chinn MS, Grunden AM. 2011. Gasification and synthesis gas fermentation: An alternative route to biofuel production. *Biofuels*. 2(4):405–419. doi:10.4155/bfs.11.108.
- Sobah S, Sulisty H, Syamsiah S. 2013. Pengolahan gas CO₂ hasil samping industri amoniak melalui gasifikasi batubara yang telah dipirolisis dengan menambahkan Ca(OH)₂. *Jurnal Rekayasa Proses*. 7(1):25–29.
- Songolzadeh M, Soleimani M, Takht Ravanchi M, Songolzadeh R. 2014. Carbon dioxide separation from flue gases: A technological review emphasizing reduction in greenhouse gas emissions. *The Scientific World Journal*. 2014:1–34. doi:10.1155/2014/828131.
- Tristantini D, Suwignjo RK, Kimia DT, Indonesia U. 2016. Suhu dan rasio kukus optimum pada proses gasifikasi kukus berkatalis K₂CO₃ terhadap arang batu bara lignit hasil pirolisis dengan laju pemanasan terkontrol. *Jurnal Rekayasa Proses*. 8(2):49–54.