

**Pengaruh Tekanan Dan Tahap Kompresi Dalam Pemurnian Biogas Menjadi Biometana Dengan Absorpsi CO<sub>2</sub> Menggunakan Air Bertekanan**

*The Effect of Pressure and Compression Ratio on Biogas Upgrading to Biomethane with CO<sub>2</sub> Absorption using Pressurized Water*

Anggit Raksajati\*, Tri Partono Adhi, Danu Ariono

Department of Chemical Engineering, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

\*Corresponding Author: [anggit@che.itb.ac.id](mailto:anggit@che.itb.ac.id)

Received: 2019-12-18

Received in revised: 2020-1-7

Accepted: 2020-5-5

Available online: 2020-5-7

**Abstract**

*Palm Oil Mill produces liquid waste in the form of palm oil mill effluent (POME). POME needs to be processed because it contains organic carbon with a COD of more than 40 g/L. One way to treat POME is by converting POME into biogas using anaerobic ponds. Biogas produced generally contains 60% methane (CH<sub>4</sub>) and 40% carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Biogas can be purified into biomethane through the technology of CO<sub>2</sub> separation, for example, by CO<sub>2</sub> absorption using water. This study evaluates the optimum pressure and feeds compression stage in biogas upgrading into biomethane. The results show that the rate of circulation of water needed to separate CO<sub>2</sub> from biogas feed decreases with increasing absorber pressure due to increased solubility of CO<sub>2</sub> in water. The optimum pressure of the biogas purification unit into biomethane is within the range of 7-10 bar. At the same absorber pressure, the overall unit price for the case with one stage of feed compression is smaller than the case with two stages of feed compression. However, the process with one compression stage has a main disadvantage of higher methane loss (5%), resulting in smaller biomethane products, compared to two-staged compression process (0.2% loss).*

*Keywords: CO<sub>2</sub> absorption, biogas, biomethane, POME, water stripping*

**Abstrak (Indonesian)**

Pabrik Kelapa Sawit menghasilkan limbah cair dalam bentuk *palm oil mill effluent* (POME). POME perlu diproses karena mengandung karbon organik dengan COD lebih dari 40 g/L. Salah satu cara untuk mengobati POME adalah dengan mengubah POME menjadi biogas menggunakan kolam anaerob. Biogas yang diproduksi umumnya mengandung 60% metana (CH<sub>4</sub>) and 40% karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Biogas dapat dimurnikan menjadi biometana melalui teknologi pemisahan CO<sub>2</sub>, misalnya dengan absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan air bertekanan. Studi ini mengevaluasi tekanan optimum dan tahap kompresi umpan dalam peningkatan biogas menjadi biometana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju sirkulasi air yang dibutuhkan untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dari biogas berkurang dengan meningkatnya tekanan absorpsi karena meningkatnya kelarutan CO<sub>2</sub> dalam air. Tekanan optimal unit pemurnian biogas menjadi biometana berada dalam rentang 7-10 bar. Pada tekanan absorpsi yang sama, harga keseluruhan untuk proses dengan satu tahap kompresi umpan lebih kecil daripada proses dengan dua tahap kompresi umpan. Namun, proses dengan satu tahap kompresi memiliki kelemahan utama kehilangan metana yang lebih tinggi (5%), dibandingkan dengan proses kompresi dua-tahap (hilang metana 0,2%).

*Kata Kunci: Absorpsi CO<sub>2</sub>, biogas, biometana, POME*

**PENDAHULUAN**

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) menghasilkan limbah cair yang dikenal sebagai *palm oil mill effluent* (POME) dalam proses produksi minyak kelapa sawit (CPO). POME merupakan air buangan, terutama

berasal dari kondensat rebusan, air hidrosiklom, dan sludge separator (Ohimain dan Izah, 2017). POME perlu diolah karena mengandung karbon organik dengan nilai COD lebih 40 g/L dan kandungan nitrogen sekitar 0,2 dan 0,5 g/L sebagai nitrogen

ammonia dan total nitrogen (Departemen Pertanian, 2006). Saat ini, salah satu jalur pengelolaan POME di PKS adalah dengan mengolah POME menjadi biogas menggunakan biogas digester (Ahmed dkk., 2014; Hasanudin dkk., 2015; Rahayu dkk., 2015). Biogas yang diproduksi umumnya mengandung 60% metana ( $\text{CH}_4$ ) dan 40% karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )

Biogas dapat dimurnikan menjadi biometana melalui teknologi pemisahan  $\text{CO}_2$  (Masebinu dkk., 2014; Ullah dkk., 2017). Pemurnian ini dilakukan meningkatkan nilai tambah bahan bakar yang dihasilkan, diantaranya dapat dimanfaatkan untuk produksi bahan bakar kendaraan (Vijay 2006; Vijay 2007). Biometana yang digunakan sebagai bahan bakar kendaraan harus memenuhi standar untuk CNG (*Compressed Natural Gas*) yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional (BSN) dengan kode SNI 8204:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Teknologi ini berpotensi untuk meningkatkan produksi bahan bakar terbarukan, seperti halnya biodiesel dan bioethanol (Malle dkk., 2014; Rosmawaty dkk., 2015; Musta dkk., 2017). Teknologi proses yang potensial untuk diterapkan dalam memurnikan biogas menjadi biometana di PKS ini adalah absorpsi  $\text{CO}_2$  dengan air (*water scrubbing*) (Andriani dkk., 2014). Teknologi ini relatif sederhana dan ekonomis dibandingkan teknologi pemisahan  $\text{CO}_2$  lainnya dan hanya membutuhkan air proses sebagai fluida kerja (Nock dkk, 2014), sehingga cocok untuk diaplikasikan di daerah rural atau perkebunan sawit, dibandingkan senyawa pelarut absorpsi  $\text{CO}_2$  lainnya seperti alkanolamina dan alkali karbonat (Raksajati dkk., 2018).

Dalam pemurnian biogas menjadi biometana, tekanan operasi memegang peranan penting dalam menjamin efisiensi dan keekonomian proses (Nock dkk., 2014). Jika tekanan operasi terlalu kecil, kelarutan  $\text{CO}_2$  dalam air bernilai kecil, sehingga dibutuhkan sirkulasi air yang besar dan membuat proses tidak ekonomis untuk mencapai target pemurnian yang ditetapkan. Di sisi lain, jika tekanan operasi terlalu tinggi, biaya yang dibutuhkan untuk mengompresi umpan biogas dari tekanan atmosferik menuju tekanan operasi absorpsi menjadi tinggi. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi dalam menentukan tekanan optimum operasi dan tahap kompresor ini. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi tekanan dan tahap kompresor optimum secara tekno-ekonomi dalam operasi pemurnian biogas menjadi biometana.

## METODOLOGI

### Alat dan Bahan

Perangkat lunak komputasi yang digunakan adalah Aspen Hysys V10 dan Aspen Process Economic Analyzer V10.

### Prosedur Kerja

Biogas sejumlah  $600 \text{ m}^3/\text{jam}$  dialirkan menuju kompresor umpan biogas untuk ditingkatkan tekanannya hingga bernilai 2-10 bar, kemudian dialirkan menuju separator 2 fasa umpan untuk dipisahkan pengotor yang terbentuk dalam fasa kondensat. Umpan biogas bersih bertekanan kemudian diumpankan ke kolom absorber dari bagian bawah kolom. Air bertekanan (sesuai tekanan absorber) diumpankan ke kolom absorber dari bagian atas kolom. Kedua aliran ini akan mengalami kontak sepanjang kolom absorpsi secara *counter-current*. Kolom absorpsi diisi *packing* yang berfungsi untuk meningkatkan luas kontak gas-cair. Gas biometana (dengan kandungan  $> 98\%$ ) akan mengalir keluar kolom absorpsi dari puncak kolom, sedangkan air yang mengandung  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$  keluar kolom dari bagian bawah kolom.

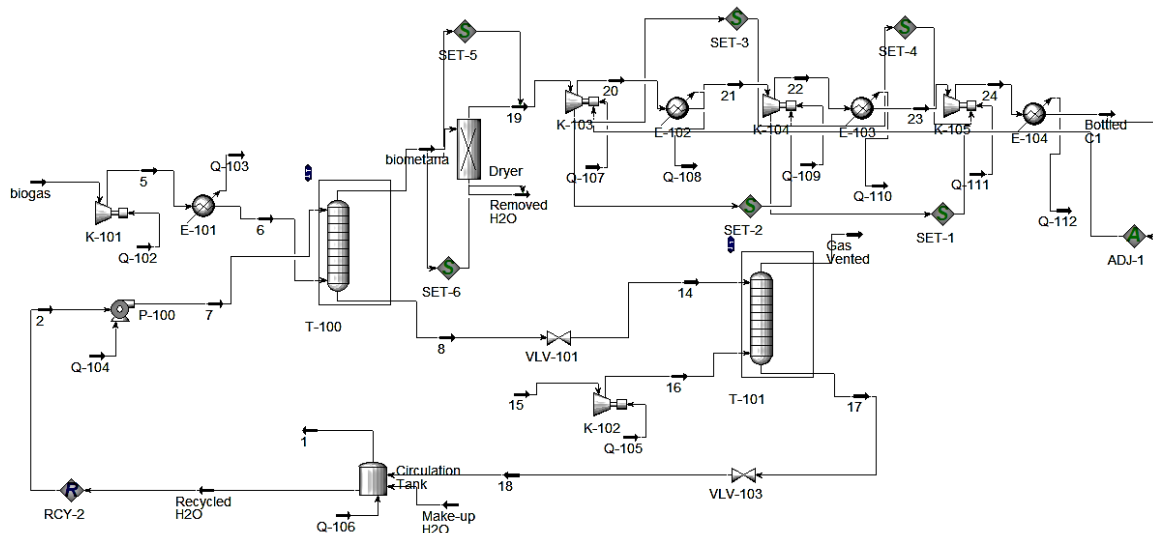
Untuk kasus dengan 2 tahap kompresi umpan, aliran air ini kemudian diturunkan tekanannya menggunakan *valve*, kemudian diumpankan menuju *flash separator* untuk dipisahkan aliran gas dan cair yang terbentuk. Aliran gas (mengandung  $\text{CH}_4$  terbawa dan sebagian  $\text{CO}_2$ ) diumpankan kembali menuju kompresor tahap 2, sedangkan aliran cair (masih mengandung  $\text{CO}_2$ ) diumpankan menuju kolom desorber. Sedangkan untuk kasus dengan 1 tahap kompresi umpan, aliran air keluaran absorber diturunkan tekanannya menggunakan *valve*, kemudian diumpankan langsung menuju desorber.

Aliran umpan desorber mengalami kontak dengan udara pelucut di sepanjang kolom desorber dengan tujuan memisahkan seluruh  $\text{CO}_2$  yang masih terlarut menuju aliran gas pelucut. Aliran air yang hampir tidak mengandung  $\text{CO}_2$  kemudian keluar dari bagian bawah kolom desorber, kemudian dialirkan kembali menuju kolom absorber dengan menggunakan pompa. Gas biometana (dengan kandungan  $> 98\%$ ) yang keluar dari puncak kolom absorpsi masuk menuju unit *dryer* untuk dipisahkan kandungan air jenuhnya, kemudian diumpankan menuju unit kompresi dan unit pembotolan biometana.

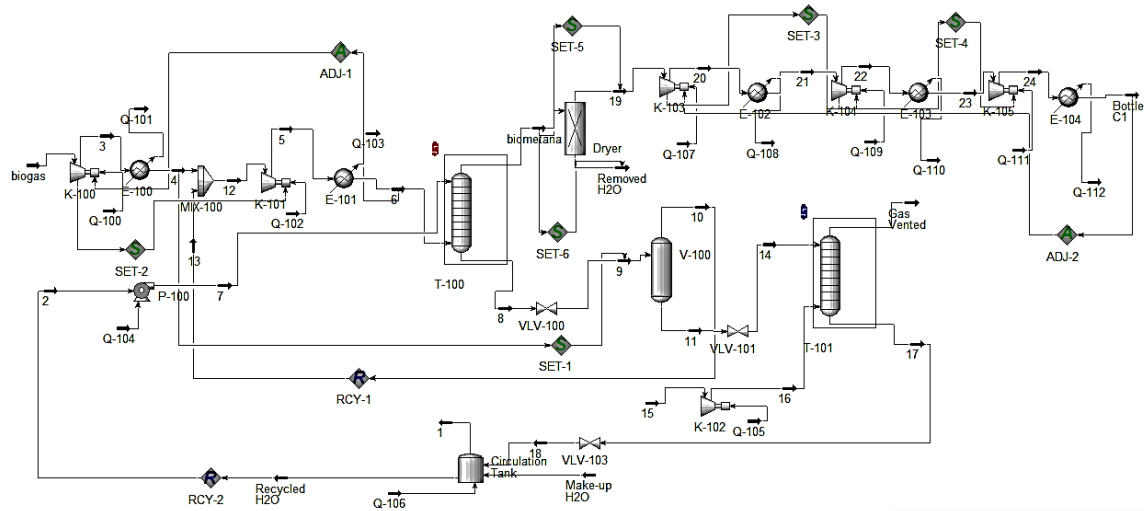
**Basis dan Asumsi**

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan persamaan aktivitas NRTL (*Non-Random Two Liquids*) untuk karakteristik fasa cair dan persamaan keadaan Peng-Robinson untuk karakteristik fasa uap. Persamaan termodinamika ini dilaporkan memiliki

tingkat akurasi yang tinggi untuk absorpsi CO<sub>2</sub> dengan air di rentang tekanan yang dievaluasi (Cozma dkk., 2014). Untuk seluruh kasus yang dievaluasi, umpan biogas diasumsikan sebesar 600 m<sup>3</sup>/jam yang merupakan laju alir tipikal biogas yang mampu



Gambar 1. Flowsheet proses pemurnian biogas dengan 1 tahap kompresi umpan



Gambar 2. Flowsheet proses pemurnian biogas dengan 2 tahap kompresi umpan

dihasilkan 1 PKS di Indonesia dengan kapasitas 30 ton TBS/jam (Rahayu dkk., 2015). Umpan biogas masuk ke unit pemurnian biogas dari POME Digester (dapat berupa *lagoon* maupun tangki berpengaduk) dengan komposisi 60%-mol CH<sub>4</sub>, 40%-mol CO<sub>2</sub>, dan 200 ppm H<sub>2</sub>S. Produk biometana yang dihasilkan dijaga dengan kemurnian 95 %-mol untuk semua kasus.

Beberapa asumsi yang diambil dalam pemodelan unit operasi antara lain:

- Hilang tekan di pipa dan *fiting* diabaikan
- Hilang tekan di alat penukar panas diasumsikan bernilai 0.2 bar.
- Efisiensi pompa, kompresor, dan blower bernilai 75%.
- Jika kompresi umpan biogas memerlukan 2 tahap kompresi (atau lebih), maka rasio kompresi tahap 1 dan tahap 2 (dan selanjutnya) diatur bernilai sama.

- Rentang tekanan absorber yang dievaluasi adalah antara 2 sampai dengan 10 bar (untuk kasus 1 tahap kompresi) serta antara 5 sampai dengan 10 bar (untuk kasus 2 tahap kompresi). Tekanan operasi di atas 10 bar tidak dievaluasi karena membutuhkan kompresor umpan 3 tahap yang menyebabkan proses tidak ekonomis.
- Kolom absorber terdiri atas 10 tahap kesetimbangan, sedangkan kolom desorber terdiri atas 3 tahap kesetimbangan. Kedua kolom ini diisi dengan isian *pall ring 1"*.
- Diameter absorber diperoleh dari hasil simulasi Aspen HYSYS V10, dengan nilai *%flooding* di tahap absorber bernilai maksimum 80%.
- Sistem utilitas dan pendukung pabrik lainnya tidak dievaluasi dengan detail.
- Evaluasi ekonomi yang dilakukan hanya sampai tahap biaya peralatan (*equipment cost*), bukan biaya kapital keseluruhan (*capital cost*) yang nilainya sangat beragam bergantung pada lokasi masing-masing aplikasi. Biaya peralatan (*equipment cost*) dinyatakan dalam basis normalisasi dengan nilai 1 menyatakan biaya untuk proses dengan 1 tahap kompresi umpan dan tekanan absorber 10 bar (*baseline*). Hal ini dilakukan karena analisis ekonomi yang disajikan dalam makalah ini adalah evaluasi tahap awal (*preliminary*), dengan demikian hanya menunjukkan kemungkinan manfaat biaya yang dapat dicapai. Variasi dalam asumsi atau basis ekonomi dapat mengubah nominal biaya yang dibutuhkan, namun kecenderungannya secara relatif menyerupai hasil dalam makalah ini.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Validasi simulasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil-hasil utama dengan studi serupa (Cozma dkk., 2014), seperti ditunjukkan Tabel 1. Untuk kebutuhan validasi ini, seluruh input simulasi dibuat sama dengan studi pembanding. Hasil simulasi dibandingkan studi pembanding memiliki selisih antara 2-3 % yang menunjukkan bahwa model simulasi yang dikembangkan valid dan dapat digunakan untuk evaluasi selanjutnya.

Tabel 1. Validasi Hasil Simulasi

Parameter	Unit	Corza* dkk., 2015	Studi ini
INPUT			
Laju alir biogas	Nm <sup>3</sup> /h	500	500
CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> umpan	%-vol.	60/38.97	60/38.97
Tekanan absorber	bar	10	10
Temperatur absorber	°C	20	20

Tahap absorber		7	7
Tekanan flash	bar	3	3
Tekanan desorber	bar	1	1
Temperatur desorber	°C	20	20
OUTPUT			
Laju alir biometana	Nm <sup>3</sup> /h	309.4	315.6
CH <sub>4</sub> biometana	%-vol.	96.7	95.3
Hilang metana	%-vol.	0.313	0.302

Gambar 3 menunjukkan pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap laju sirkulasi air dan persentase hilang metana. Untuk kedua kasus (1 tahap dan 2 tahap kompresi), laju sirkulasi air yang dibutuhkan untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dari umpan biogas menurun seiring dengan peningkatan tekanan absorber. Hal ini disebabkan kelarutan CO<sub>2</sub> dalam air meningkat seiring dengan peningkatan tekanan, sehingga jumlah air yang dibutuhkan menurun untuk melarutkan CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang tetap.

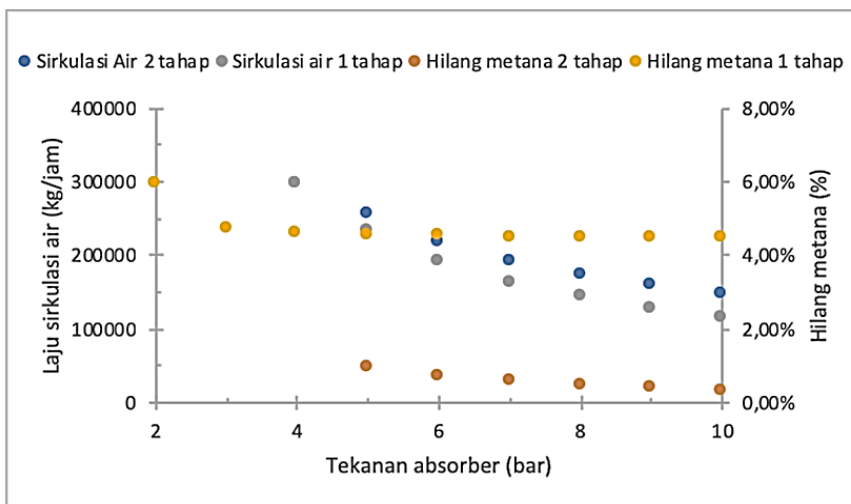
Pada tekanan absorber yang sama, kasus dengan 1 tahap kompresi umpan membutuhkan laju sirkulasi air yang lebih kecil dan menghasilkan hilang metana yang lebih besar dibandingkan kasus dengan 2 tahap kompresi umpan. Jika umpan dikompresi 2 tahap, sebagian besar metana yang terbawa air keluaran absorber dapat dikembalikan menuju absorber melalui keluaran uap unit *Flash Tank*. Hal ini menunjukkan keunggulan proses 2 tahap kompresi umpan karena menurunnya hilang metana menyebabkan peningkatan laju produk biometana. Akan tetapi, aliran balik (*recycle*) keluaran *flash tank* yang diumpankan kembali menuju kompresor tahap 2 dan kolom absorber bukan hanya mengandung metana, melainkan juga komponen CO<sub>2</sub>. Hal ini mengakibatkan laju sirkulasi air yang dibutuhkan untuk proses ini lebih besar dibandingkan proses dengan 1 tahap kompresi umpan karena lebih banyaknya gas CO<sub>2</sub> yang berada di kolom absorber akibat aliran balik ini.

Gambar 4 menunjukkan pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap kerja pompa dan kerja kompresor biogas. Untuk kedua kasus (1 tahap dan 2 tahap kompresi), kerja pompa sirkulasi dan kerja kompresor biogas meningkat seiring dengan peningkatan tekanan absorber. Kerja pompa sirkulasi air meningkat akibat peningkatan beda tekan pompa yang dibutuhkan, walaupun pompa mengalirkan air dengan laju sirkulasi yang lebih rendah seperti ditunjukkan Gambar 2. Hal ini menunjukkan bahwa beda tekan pompa lebih berpengaruh signifikan dibandingkan laju sirkulasi air terhadap kerja pompa keseluruhan. Kerja kompresor biogas meningkat seiring dengan peningkatan tekanan absorber akibat

beda tekan kompresor meningkat untuk mencapai tekanan absorber.

Pada tekanan absorber yang sama, kasus dengan 1 tahap kompresi umpam membutuhkan kerja pompa sirkulasi dan kerja kompresor biogas yang lebih kecil

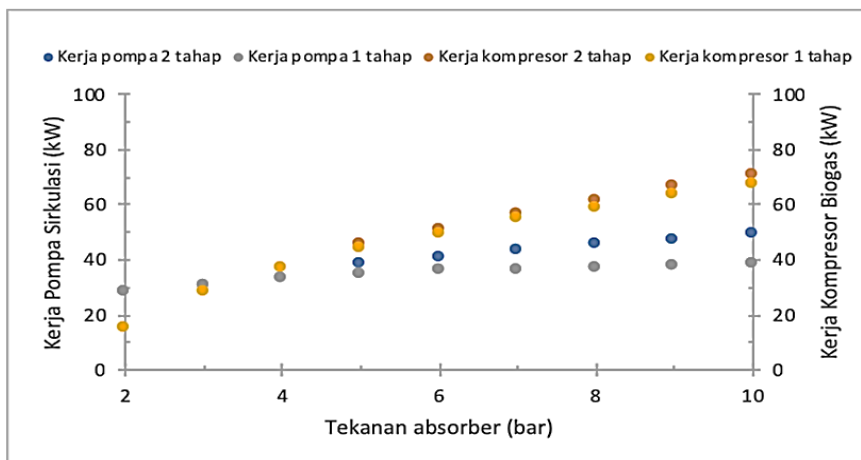
Gambar 5 menunjukkan pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap harga kompresor biogas dan harga seluruh unit yang dibutuhkan. Untuk kedua kasus (1 tahap dan 2 tahap kompresi), harga kompresor biogas meningkat seiring dengan



Gambar 3. Pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap laju sirkulasi air dan hilang metana

dibandingkan kasus dengan 2 tahap kompresi umpam. Kerja pompa sirkulasi untuk proses 1 tahap kompresi umpam bernilai lebih kecil karena laju sirkulasi air yang dibutuhkan lebih kecil dibandingkan proses dengan 2 tahap kompresi umpam (pada tekanan absorber yang sama) seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Kerja kompresor biogas untuk proses 1 tahap kompresi umpam bernilai lebih kecil (pada tekanan absorber yang sama) karena proses dengan 2 tahap kompresi umpam menerima aliran (*recycle*) dari keluaran uap *flash tank*, seperti dijelaskan sebelumnya, yang mengakibatkan peningkatan laju alir umpam kompresor tahap 2.

peningkatan tekanan absorber akibat beda tekan kompresor meningkat untuk mencapai tekanan absorber, sehingga dibutuhkan kompresor dengan spesifikasi yang lebih tinggi. Harga seluruh peralatan menurun seiring peningkatan tekanan dari 2 bar sampai 7 bar, lalu melandai dan relatif stabil antara 7 bar sampai 10 bar. Pada rentang 7-10 bar ini, peningkatan harga kompresor umpam terkompensasi dengan penurunan harga kompresor produk biometana dan tangki sirkulasi yang signifikan. Hal ini konsisten dengan tren penurunan laju sirkulasi air (Gambar 3), dimana penurunan laju sirkulasi air pada rentang 7-10 bar relatif lebih landai dibandingkan



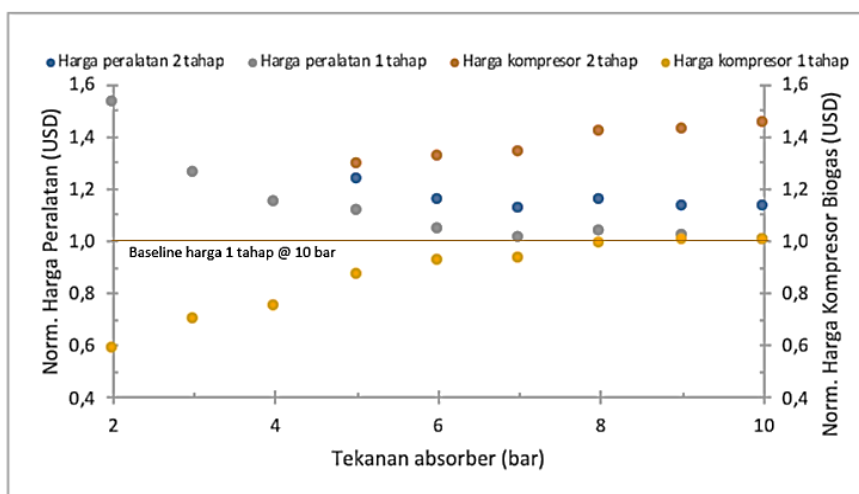
Gambar 4. Pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap kerja pompa sirkulasi dan kompresor biogas

pada rentang 2-7 bar. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa tekanan optimum unit pemurnian biogas menjadi biometana berada pada rentang 7-10 bar. Rentang ini sesuai dengan hasil yang dilaporkan pada studi oleh Bauer dkk. (Bauer dkk., 2013).

Pada tekanan absorber yang sama, harga kompresor biogas serta keseluruhan unit untuk kasus dengan 1 tahap kompresi umpan bernilai lebih kecil dibandingkan kasus dengan 2 tahap kompresi umpan. Hal ini disebabkan adanya aliran balik (*recycle*) pada proses dengan 2 tahap kompresi umpan menyebabkan peningkatan biaya kompresor biogas, pompa sirkulasi, dan tangki sirkulasi, seperti dijelaskan

seiring dengan peningkatan tekanan, sehingga jumlah air yang dibutuhkan menurun untuk melarutkan CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang tetap. Kerja pompa sirkulasi air dan kerja kompresor biogas meningkat akibat peningkatan beda tekan pompa serta kompresor yang dibutuhkan.

Berdasarkan evaluasi harga peralatan yang dibutuhkan, tekanan optimum unit pemurnian biogas menjadi biometana berada pada rentang 7-10 bar. Harga seluruh peralatan menurun seiring peningkatan tekanan dari 2 bar sampai 7 bar, lalu melandai dan relatif stabil antara 7 bar sampai 10 bar. Pada rentang 7-10 bar ini, peningkatan harga kompresor umpan terkompensasi dengan penurunan



Gambar 5. Pengaruh tekanan dan tahap kompresi terhadap harga peralatan dan biaya operasional

sebelumnya. Namun, hal ini belum dapat menyimpulkan bahwa proses dengan 1 tahap kompresi lebih ekonomis secara keseluruhan dibandingkan proses dengan 2 tahap kompresi karena adanya kerugian berupa hilang metana yang lebih tinggi (Gambar 3), sehingga menghasilkan produk biometana yang lebih kecil.

Gambar 6 menunjukkan rincian harga peralatan untuk kasus optimum, yaitu kasus 2 tahap kompresi umpan pada tekanan absorber 10 bar. Unit kompresor pembotolan biometana dan kompresor umpan biogas merupakan 2 unit dengan biaya tertinggi, yaitu menyumbang 49% dan 26% dari keseluruhan biaya peralatan.

## KESIMPULAN

Laju sirkulasi air yang dibutuhkan untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dari umpan biogas menurun seiring dengan peningkatan tekanan absorber. Hal ini disebabkan kelarutan CO<sub>2</sub> dalam air meningkat

harga kompresor produk biometana dan tangki sirkulasi yang signifikan. Pada tekanan absorber yang sama, harga keseluruhan unit untuk kasus dengan 1 tahap kompresi umpan bernilai lebih kecil dibandingkan kasus dengan 2 tahap kompresi umpan. Hal ini disebabkan adanya aliran balik (*recycle*) pada proses dengan 2 tahap kompresi umpan menyebabkan peningkatan biaya kompresor biogas, pompa sirkulasi, dan tangki sirkulasi. Namun, belum dapat disimpulkan bahwa proses dengan 1 tahap kompresi lebih ekonomis secara keseluruhan dibandingkan proses dengan 2 tahap kompresi karena adanya kerugian berupa hilang metana yang lebih tinggi, sehingga menghasilkan produk biometana yang lebih kecil. Evaluasi yang lebih mendalam disertai penetapan spesifikasi proses (misalnya pembatasan persentase hilang metana) untuk masing-masing aplikasi akan menentukan tahap kompresi umpan yang optimum.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih atas dana penelitian yang disediakan oleh Institut Teknologi Bandung melalui Program P3MI.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Andriani, D., Wresta, A., Atmaja, T. D., and Saepudin, A. 2014. A Review On Optimization Production and Upgrading Biogas Through CO<sub>2</sub> Removal Using Various Techniques, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 172(4), 1909–1928.
- Ahmed, Y., Yaakob, Z., Akhtar, P., and Sopian, K., 2015. Production Of Biogas And Performance Evaluation Of Existing Treatment Processes In Palm Oil Mill Effluent (POME), *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 42, 1260–1278.
- Badan Standardisasi Nasional, 2016. Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Gas Jenis Compressed Natural Gas (CNG) Untuk Sektor Transportasi.
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., and Tamm, D., 2013. Biogas upgrading—Review Of Commercial Technologies, *SGC Rapport Vol. 270*, Svenskt Gastekniskt Center AB.
- Cozma, P., and Wukovits, W., 2014. Modeling and Simulation of High-Pressure Water Scrubbing Technology Applied for Biogas Upgrading, *Clean Technol. Envir.*, 17(2), 373-391.
- Direktorat Pengelolaan Hasil Pertanian, 2006. *Pedoman Pengelolaan Limbah Industri Sawit*, Departemen Pertanian, Jakarta.
- Hasanudin, U., Sugiharto, R., Haryanto, A., Setiadi, T., and Fujie, K., 2015. Palm Oil Mill Effluent Treatment and Utilization to Ensure the Sustainability of Palm Oil Industries, *Wat. Sci. Tech.*, 72(7), 1089-1095.
- Malle, D., Kapelle, I. B. D., dan Lopulaian, F., 2014. Pembuatan Bioetanol dari Limbah Air Kelapa Melalui Proses Fermentasi, *Indo. J. Chem. Res.*, 2(1), 155-159.
- Masebinu, S. O., Aboyade, A., and Muzenda, E., 2014. Enrichment of Biogas for Use as Vehicular Fuel: A Review of the Upgrading Techniques, *Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math*, 1(1), 88–97.
- Musta, R., Haetami, A., and Salmawati, M., 2017. Biodiesel Hasil Transesterifikasi Minyak Biji Nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) Dengan Metanol, *Indo. J. Chem. Res.*, 4(2), 394-401.
- Nock, W.J., Walker, M., Kapoor, R., and Heaven, S., 2014. Modelling the Water Scrubbing Process and Energy Requirements for CO<sub>2</sub> Capture to Upgrade Biogas to Biomethane, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 12783-12792.
- Ohimain, E. I., and Izah, S. C., 2017. A review of Biogas Production From Palm Oil Mill Effluents Using Different Configurations of Bioreactors, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 70, 242–253.
- Research Division Thermal Process Engineering and Simulation, 2012. *Biogas To Biomethane Technology Review*, Institute of Chemical Engineering, TU Wien, Vienna.
- Rahayu, A.S., Karsiwulan, D., Yuwono, H., Trisnawati, I., Mulyasari, S., Rahardjo, S., Hokermin, S., dan Paramita, V., 2015. *Buku Panduan Konversi POME Menjadi Biogas – Pengembangan Proyek di Indonesia*, USAID, Winrock International, Jakarta.
- Raksajati, A., Ho, M. T., and Wiley, D. E., 2018. Comparison of Solvent Development Options for Capture of CO<sub>2</sub> from Flue Gases, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 57(19), 6746-6758.
- Raksajati, A., and Ho, M. T., 2014. Solvent Development for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture: Recent Development and Opportunities, *MATEC Web Conf.*, 156, 03-015.
- Rosmawaty, Bandjar, A., dan Gunoroso, S., 2015. Optimasi Kondisi Reaksi Transesterifikasi pada Pembuatan Biodiesel dari Lemak Sapi, *Indo. J. Chem. Res.*, 2(2), 213-222.
- Ullah, I. Othman, D. Hashim, H. Matsuura, T. Ismail, A. F. Rezaei-dashtarzhandi, M., and Azelee, I. W., 2017. Biogas as A Renewable Energy Fuel – A Review Of Biogas Upgrading, Utilisation and Storage, *Energy Convers. Manag.* 150, 277–294.
- Vijay, V.K., Chandra, R., Subbarao, P.M.V., and Kapdi, S.S., 2006. Biogas Purification and Bottling into CNG Cylinders: Producing Bio-CNG from Biomass for Rural Automotive Application, The 2<sup>nd</sup> Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”, Thailand.
- Vijay, V.K., 2007. Biogas Refining for Production of Bio-Methane and its Bottling for Automotive Application and Holistic Development, *International Symposium on EcoTopia Science*, 623-628.