

Studi Pengoperasian Regulator Penurun Tekanan untuk Menghindari Pembentukan Hidrat pada Proses Dekompresi CNG Menggunakan COMSOL dan Aspen HYSYS

Mochammad Syahrir Isdiawan^{1*}, Yansen Hartanto²

¹ Departemen Produksi I A, Kompartemen Pabrik I, PT Petrokimia Gresik, Jalan Jenderal Ahmad Yani, Gresik, Jawa Timur, 61119, Indonesia.

² Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Parahyangan, Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat, 40141, Indonesia.

*e-mail: syahrir.isdiawan@petrokimia-gresik.com

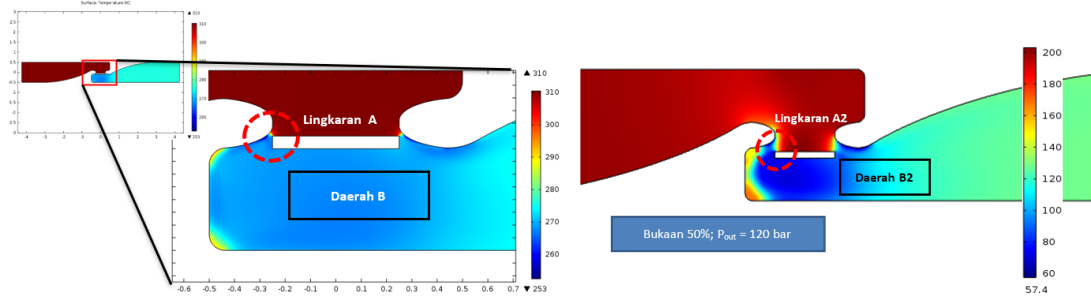
Abstrak. *Compressed Natural Gas (CNG) diproduksi dengan cara memampatkan gas alam sampai tekanan 200 bar pada temperatur ambien lalu disimpan dalam tabung bertekanan tinggi. Dalam penggunaannya, CNG dialirkan pada regulator penurun tekanan untuk diturunkan tekanannya menjadi 3 bar melalui dua tahap penurunan. Penurunan tekanan tahap pertama adalah dari tekanan 200 bar menjadi 70 bar. Penurunan tekanan yang drastis menimbulkan potensi terbentuknya hidrat yang mengakibatkan penyumbatan aliran gas. Penelitian ini bertujuan untuk mencari solusi pencegahan terbentuknya hidrat melalui studi fenomena aliran pada regulator tahap pertama menggunakan perangkat lunak COMSOL dan studi kurva pembentukan hidrat dengan bantuan ASPEN HYSYS. Penelitian ini menunjukkan bahwa pada bukaan 25%, hidrat akan terbentuk pada daerah celah katup dan pada outlet regulator. Hidrat pada celah katup dapat tersapu oleh kecepatan gas yang mencapai 400 m/s sedangkan hidrat pada outlet regulator dapat menyebabkan sumbatan karena kecepatan gas hanya 0,05 m/s. Selain itu, bukaan katup 50% mampu mencegah pembentukan hidrat meskipun tekanan outlet mencapai 120 bar sedangkan tekanan outlet yang diinginkan hanya 70 bar. Kemudian, pemanasan gas inlet sebesar 25°C dapat mencegah pembentukan hidrat pada bukaan katup 25%. Lalu, injeksi metanol sebesar 2%-wt dari laju alir gas dapat menghilangkan potensi terbentuknya hidrat tanpa memanaskan umpan pada bukaan katup 25% karena injeksi metanol mampu menggeser kurva pembentukan hidrat ke area sebelah kiri.*

Kata kunci: ASPEN HYSYS, CFD, gas alam, hidrat, regulator, simulasi.

Abstract. *Simulation of Pressure Regulator to Avoid the Formation of Hydrates in Natural Gas Decompression. Compressed Natural Gas (CNG) is produced by compressing natural gas to a pressure of 200 bar at ambient temperature and then stored in high-pressure cylinders. In its use, CNG is flowed to the pressure reducing regulator to reduce the pressure to 3 bar through two stages. The pressure drop in the first stage is from 200 to 70 bar. A drastic pressure drop creates the potential for hydrate formation, which results in blockage of gas flow. This study aims to find solutions to prevent the hydrate formation through the study of phenomena in the first stage regulator using COMSOL software and the study of the hydrate formation curve with the help of ASPEN HYSYS. This research shows that at 25% opening, hydrate will form in the valve gap area and at the regulator's outlet. The hydrate at the gap can be swept away by the gas velocity reaching 400 m/s, while the hydrate at the regulator outlet can cause blockage because the gas velocity is only 0.05 m/s. In addition, the 50% valve opening can prevent hydrate formation even though the outlet pressure reaches 120 bar while the desired pressure is only 70 bar. Then, heating the inlet gas by 25°C can prevent the formation of hydrates at 25% valve opening. Furthermore, methanol injection at 2%-wt of gas flow rate can eliminate the potential for hydrate formation without heating the feed at 25% valve opening because methanol injection can shift the hydrate formation curve to the left area.*

Keywords: ASPEN HYSYS, CFD, hydrate, natural gas, regulator, simulation.

Graphical Abstract



1. Pendahuluan

Saat ini, gas alam menjadi salah satu bahan bakar yang sering digunakan baik pada sektor industri, transportasi, maupun rumah tangga (Feijoo dkk., 2018; Kazda dkk., 2020; Sen dkk., 2019). Namun, infrastruktur pipa gas yang belum memadai terkadang menjadi hambatan bagi sebagian industri untuk menggunakan bahan bakar gas (Feijoo dkk., 2018). Tantangan ini memunculkan ide transportasi gas menggunakan tabung bertekanan. Gas alam dimampatkan sampai tekanan 200 bar pada temperatur ambien lalu disimpan dalam tabung bertekanan tinggi.

Dalam penggunaannya, gas alam termampatkan (*compressed natural gas / CNG*) dialirkan terlebih dahulu pada regulator atau unit penurun tekanan untuk diturunkan tekanannya dari 200 bar menjadi 3 bar. Penurunan tekanan dilakukan dengan dua tahap penurunan. Penurunan tekanan tahap pertama adalah dari tekanan 200 bar menjadi 70 bar. Kemudian pada tahap kedua, gas diturunkan dari 70 bar menjadi 3 bar.

Pada penurunan tekanan yang drastis, dapat terjadi penurunan temperatur yang signifikan sehingga menyebabkan *freezing* (Glaun dkk., 2013). *Freezing* adalah pembentukan hidrat yang umumnya berupa butiran es di dalam pipa yang mengakibatkan penyumbatan aliran (Anthony dkk., 2019). Pembentukan hidrat ini harus dihindari agar tidak terjadi kegagalan produksi (Kiran & Prasad, 2021). Selain itu, pembekuan dapat mengakibatkan pengukuran volume gas yang tidak akurat (Liu dkk., 2019).

Opsi yang dapat dilakukan untuk menghindari formasi hidrat adalah dengan memanaskan umpan atau injeksi fluida inhibitor hidrat (Wang dkk., 2018). Salah satu fluida inhibitor hidrat yang banyak digunakan adalah metanol (Jacomel dkk., 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi terhadap permasalahan hidrat pada proses dekomposisi CNG. Karena hidrat dapat menyebabkan kerugian sebesar 250 juta rupiah per kegagalan produksi, maka penelitian hidrat ini tidak dapat dilakukan secara aktual pada peralatan yang ada. Oleh karena itu, penelitian ini perlu dilakukan dengan menggunakan metode penelitian kering (*dry research*) yang menggunakan pendekatan kasus aktual dalam sebuah perangkat lunak simulasi. Perangkat lunak tersebut harus mampu memberikan pemahaman terhadap fenomena, perilaku, dan karakteristik gas alam yang melewati regulator. Untuk mendapatkan pemahaman

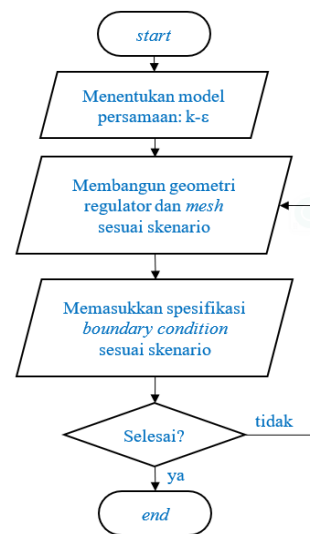
tersebut, penelitian ini menggunakan perangkat lunak *computational fluid dynamics* (CFD).

Pemanfaatan CFD untuk studi fenomena dan perilaku hidrat metana telah berhasil dilakukan, seperti pada valve (Glaun dkk., 2013), pipa transportasi gas (Duan dkk., 2021; Jozian dan Vafajoo, 2018; Umute, 2020), dan hydrocyclone (Fang dkk., 2022; Qiu dkk., 2019). Meskipun studi hidrat pada valve pernah dilakukan oleh Glaun dkk., (2013), komposisi gas dan bentuk valve yang digunakan pada penelitian itu berbeda jika dibandingkan dengan yang digunakan pada penelitian ini sehingga fenomena kuantitatif yang didapat pasti berbeda. Meskipun begitu, berdasarkan keberhasilan penelitian-penelitian terdahulu tersebut, penggunaan simulasi CFD pada kasus ini juga diharapkan dapat berhasil memberikan solusi tanpa perlu meluangkan waktu dan biaya untuk melaksanakan penelitian aktual di lapangan.

2. Metodologi

2.1. Alur Kerja Penelitian

Studi ini bersifat kering (*dry research*) melalui bantuan perangkat lunak simulasi proses dan CFD. Simulator proses yang digunakan adalah ASPEN HYSYS v11 (lisensi akademik) dan COMSOL Multiphysics v5 (lisensi akademik). Gambar 1 menunjukkan alur kerja pada studi ini.

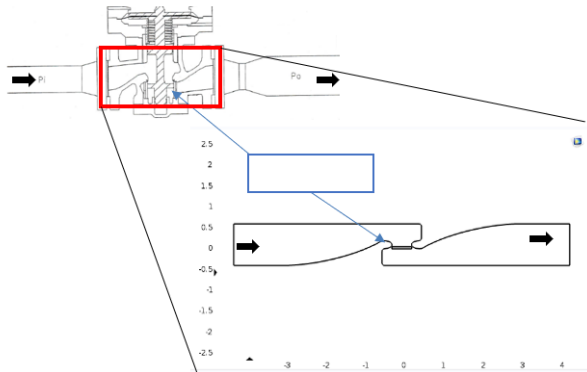


Gambar 1. Diagram Alir Pekerjaan

2.2. Pemodelan Proses

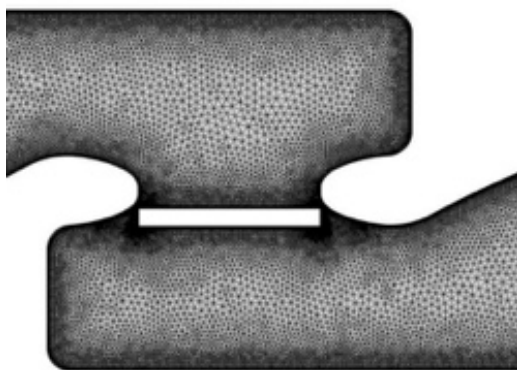
2.2.1. Regulator

Model yang dibangun adalah model regulator dengan mengacu kepada dimensi regulator aktual. Pemodelan regulator disederhanakan menjadi bentuk 2 dimensi sesuai Gambar 2.



Gambar 2. Model Regulator Tekanan 2 Dimensi

Hasil pemodelan regulator tersebut diterjemahkan ke dalam bentuk diskritisasi spasial (*mesh*). Metode yang digunakan dalam diskritisasi spasial adalah metode elemen hingga (*finite element*).



Gambar 3. Hasil Pemodelan 2D dan *Meshing* Regulator Penurun Tekanan

2.2.2. Spesifikasi CNG

Spesifikasi CNG yang digunakan merujuk pada komposisi CNG aktual yang digunakan pada pipa gas PT ABC. Hasil analisa komposisi gas periode 31 Maret 2015 – 6 April 2015 ditampilkan pada Tabel 1.

2.2.3. Syarat Batas

Simulasi CFD selalu memulai perhitungan dari nilai yang telah ditetapkan di ujung geometri. Nilai tersebut adalah syarat batas. Syarat batas yang digunakan dirangkum pada Tabel 2.

2.3. Skenario Kasus

Skenario pemodelan yang digunakan adalah sebagai berikut.

2.3.1. Base case

Mengamati fenomena pembentukan hidrat pada regulator dengan 25% bukaan. Syarat batas yang digunakan pada skenario ini mengacu pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi CNG

No	Komponen	Kandungan Fraksi Molar
1.	Nitrogen	0,0772
2.	CO ₂	0,0450
3.	Metana	0,8238
4.	Etana	0,0243
5.	Propana	0,0151
6.	n-Butana	0,0036
7.	i-Butana	0,0036
8.	n-Pentana	0,0010
9.	i-Pentana	0,0017
10.	n-Heksana	0,0038
11.	H ₂ O	0,0010

Tabel 2. Syarat Batas untuk Pemodelan

No	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Tekanan inlet	bar	200
2.	Tekanan outlet	bar	70
3.	Temperatur inlet	°C	40
		K	313,15
4.	Laju alir inlet	ton/jam	40
		m ³ /s	0,0599
		m/s	8,63
5.	Densitas inlet	kg/m ³	185,6
6.	Viskositas	cP	0,0213
7.	Cp/Cv		1,7970

2.3.2. Skenario 1

Melakukan variasi bukaan katup pada regulator dengan tiga variasi bukaan, yaitu: 25% bukaan, 30% bukaan, dan 50% bukaan. Syarat batas yang digunakan pada skenario ini mengacu pada Tabel 2.

2.3.3. Skenario 2

Memanaskan gas umpan sebesar 25°C (298 K) dari 40°C (313 K) menjadi 65°C (338 K) sebelum masuk regulator. Syarat batas yang digunakan pada skenario ini mengacu pada Tabel 2.

2.3.4. Skenario 3

Menginjeksikan metanol pada CNG sebelum memasuki regulator penurun tekanan. Pada skenario 3, umpan simulasi berupa fluida campuran gas alam dan metanol. Fluida campuran masuk pada regulator dengan bukaan 25%. Khusus pada skenario 3, syarat batas yang digunakan merujuk pada Tabel 3.

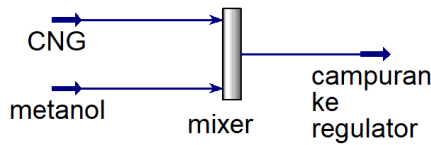
Pada skenario 3, laju alir umpan sebesar 42,1 ton/jam berasal dari campuran metanol 2,1 ton/jam dan CNG 40 ton/jam. Penentuan angka kebutuhan metanol sebesar 2,1 ton/jam merujuk pada bagian hasil dan pembahasan sub bab 3.3 yang menggunakan ASPEN HYSYS. *Fluid package* yang digunakan adalah Peng-Robinson sesuai

Studi Pengoperasian Regulator Penurun Tekanan untuk Menghindari Pembentukan Hidrat pada Proses Dekompresi CNG Menggunakan COMSOL dan Aspen HYSYS

rekomenadasi fitur *methods assistant*. Skema proses injeksi metanol pada CNG sebelum masuk regulator penurun tekanan dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 3. Syarat Batas untuk Skenario 3

No	Parameter	Satuan	Nilai
1.	Tekanan inlet	bar	200
2.	Tekanan outlet	bar	70
3.	Temperatur inlet	°C	40
		K	313,15
4.	Laju alir inlet	ton/jam	42,1
		m ³ /s	0,0560
		m/s	8,07
5.	Densitas inlet	kg/m ³	208,8
6.	Viskositas	cP	0,0223
7.	Cp/Cv		1,9260



Gambar 4. Diagram Alir Proses Injeksi Metanol pada CNG

2.4. Persamaan Matematika

Persamaan matematika yang digunakan untuk menggambarkan fenomena perilaku gas adalah persamaan Navier-Stokes (Bird dkk., 2002).

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} \quad (1)$$

Nilai koefisien energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi (ϵ) untuk model tersebut diperoleh dengan persamaan (2) dan (3) (Lauder & Spalding, 1974).

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i}(\rho k u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \epsilon) + \frac{d}{dx_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{d\epsilon}{dx_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ adalah konstanta yang telah ditentukan secara eksperimen dengan nilai sebagai berikut (Lauder & Spalding, 1974):

$$C_{1\epsilon} = 1,44; C_{2\epsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09$$

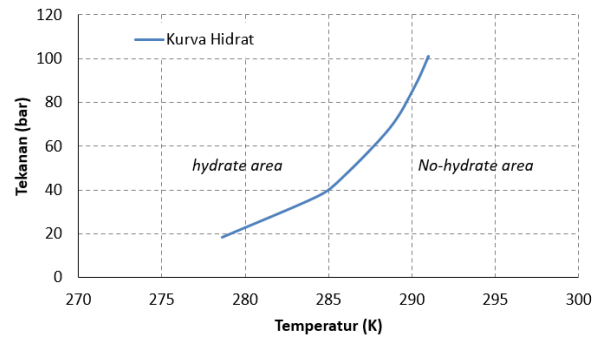
σ_k dan σ_ϵ adalah bilangan Prandtl untuk energi kinetik turbulen dan tingkat disipasi. Kedua parameter tersebut juga telah didapatkan melalui eksperimen dan didefinisikan sebagai berikut (Lauder dan Spalding, 1974):

$$\sigma_k = 1,0; \sigma_\epsilon = 1,3$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kurva Pembentukan Hidrat

Kondisi operasi pembentukan hidrat bersifat spesifik untuk setiap komposisi CNG. Kurva pembentukan hidrat untuk komposisi CNG sesuai Tabel 1 ditampilkan pada Gambar 5. Hidrat berpotensi terbentuk pada daerah di sebelah kiri kurva pembentukan hidrat pada Gambar 5.

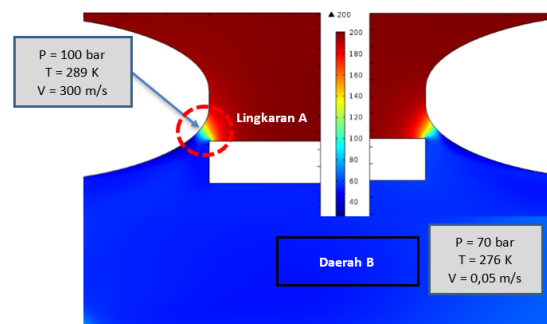


Gambar 5. Kurva Pembentukan Hidrat untuk CNG dengan Komposisi sesuai Tabel 1 dari ASPEN HYSYS

3.2. Base Case: Bukaannya Katup 25%

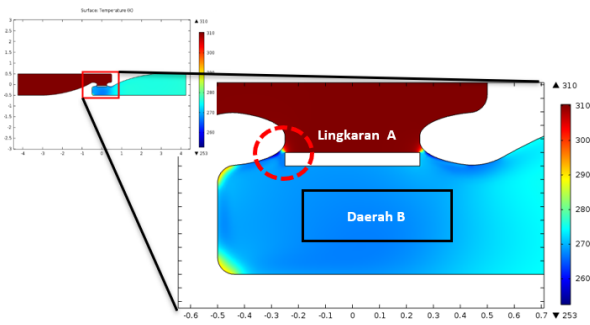
Profil tekanan, temperatur, dan kecepatan gas skenario *base case* dengan 25% bukaan ditampilkan pada Gambar 6, 7, dan 8.

Gambar 6, 7, dan 8 memperlihatkan bahwa hidrat berpotensi terbentuk pada daerah celah katup yang diberi tanda oleh lingkaran A. Kondisi pada celah katup pusat lingkaran A adalah tekanan 100 bar dan temperatur 289 K yang sudah berada pada zona pembentukan hidrat menurut Gambar 5. Namun, pada celah katup tersebut kecepatan gas berada pada kecepatan tertinggi sebesar 400 m/s. Ketika gas memiliki kecepatan yang cukup tinggi, maka hidrat pada celah tersebut tidak menyebabkan penyumbatan karena hidrat tersapu oleh aliran gas.

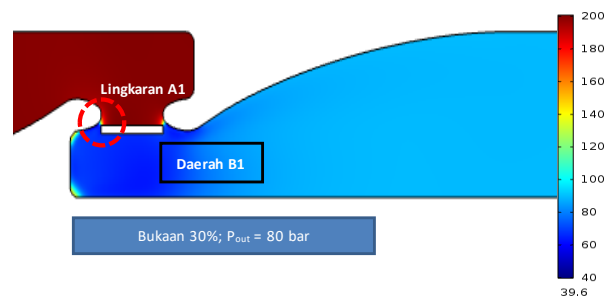


Gambar 6. Profil Tekanan (bar) pada 25% Bukaannya Katup

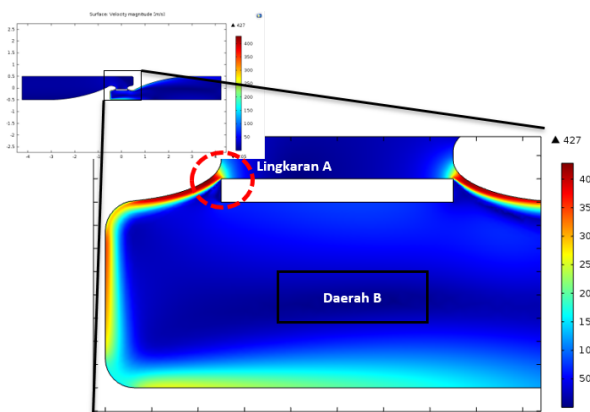
Ketika gas melewati katup menuju daerah B, kecepatan kembali menurun dan kecepatan minimal gas berada pada daerah outlet sebesar 0,05 m/s. Pada daerah B ini, gas berada pada zona pembentukan hidrat sehingga menyebabkan penyumbatan tanpa bisa tersapu oleh aliran gas.



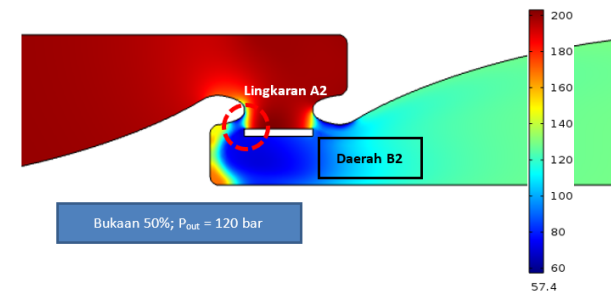
Gambar 7. Profil Temperatur (K) pada 25% Bukaannya



Gambar 10. Profil Tekanan (bar) pada Bukaannya Katup 30%



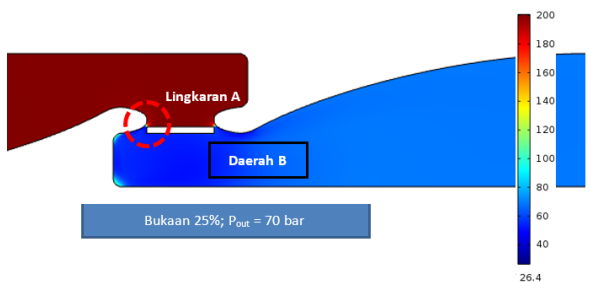
Gambar 8. Profil Kecepatan (m/s) pada 25% Bukaannya



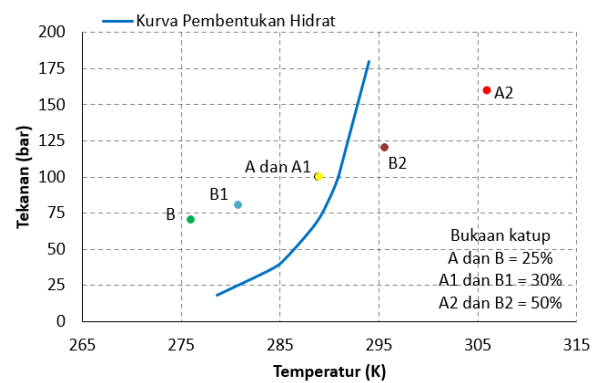
Gambar 11. Profil Tekanan (bar) pada Bukaannya Katup 50%

3.3. Skenario 1: Bukaannya Katup 25%, 30%, dan 50%

Hasil profil tekanan regulator pada bukannya katup 25%, 30%, dan 50% disajikan pada Gambar 9, 10, dan 11. Angka tekanan dari setiap profil diplotkan pada Gambar 12 untuk mengetahui posisi kondisi operasi gas terhadap kurva pembentukan hidrat.



Gambar 9. Profil Tekanan (bar) pada Bukaannya Katup 25%



Gambar 12. Profil Operasi Celah Katup dan Outlet Regulator pada Setiap Bukaannya Katup

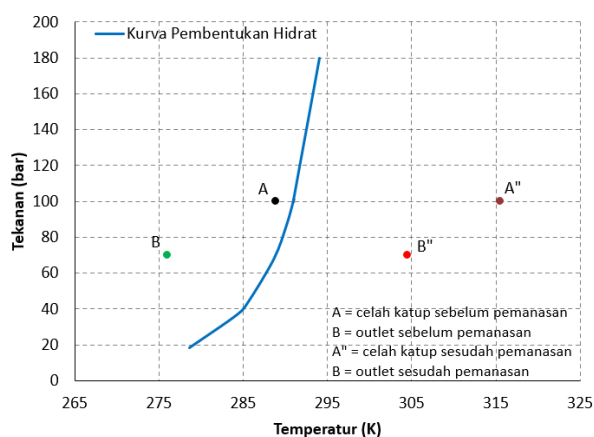
3.4. Skenario 2: Pemanasan Gas Umpan sebesar 25°C (25 K)

Sebelum gas memasuki regulator, gas terlebih dahulu dipanaskan sebesar 25°C (25 K) dari 40°C (313 K) menjadi 65°C (338 K). Skenario 2 tidak memodelkan sistem pemanas, tetapi hanya mengubah temperatur gas umpan menjadi langsung 65°C. Bukaannya katup dibuat sesuai *base case* yaitu 25% bukannya. Hasil profil tekanan dan temperatur berikutnya diplotkan pada Gambar 13.

Karena adanya pemanasan ini, gas umpan yang awalnya berada pada kondisi pembentukan hidrat mengalami peningkatan suhu sehingga kondisi gas bergeser ke kondisi *no hydrate* sesuai Gambar 13.

Dari Gambar 9, 10, dan 11, terlihat bahwa semakin besar bukannya katup, tekanan outlet gas semakin besar. Berdasarkan Gambar 12, pembentukan hidrat di celah katup maupun outlet dapat dihindari dengan memperbesar bukannya katup menjadi 50%. Tetapi, tekanan outlet yang dihasilkan dari bukannya 50% adalah 120 bar. Angka ini berbeda dari tekanan outlet sebelumnya yang diinginkan yaitu 70 bar dan dapat membebani regulator kedua untuk menurunkan tekanan ke 3 bar.

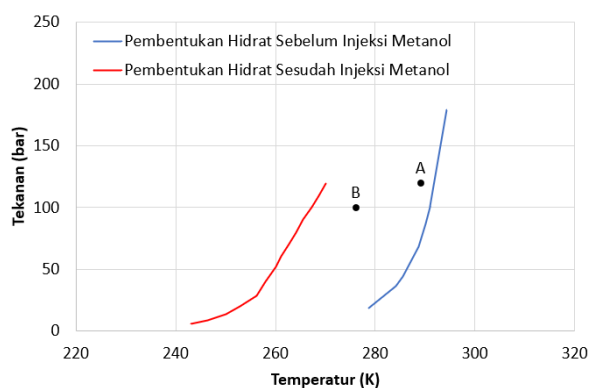
Studi Pengoperasian Regulator Penurun Tekanan untuk Menghindari Pembentukan Hidrat pada Proses Dekompresi CNG Menggunakan COMSOL dan Aspen HYSYS



Gambar 13. Kondisi Operasi Celah Katup dan Outlet Regulator pada Bukaannya 25% saat Sebelum dan Sesudah Pemanasan Umpan

3.5. Skenario 3: Injeksi Metanol pada Bukaannya 25%

Proses injeksi metanol diperlukan pada gas sebelum memasuki regulator agar *free water* yang terbentuk pada campuran gas dapat terserap oleh metanol sehingga mencegah terbentuknya hidrat. Untuk mencegah pembentukan hidrat, diperlukan metanol sebesar minimal 2%-wt dari laju alir gas umpan. Setelah proses injeksi metanol, terjadi pergeseran kurva pembentukan hidrat ke sebelah kiri sesuai Gambar 14. Dengan kondisi ini, maka pembentukan hidrat dapat dicegah pada regulator tanpa mengubah bukaan katup regulator dan tanpa memanaskan gas umpan.



Gambar 14. Kondisi Operasi Celah Katup dan Outlet Regulator pada Bukaannya 25% saat Sebelum dan Sesudah Pemanasan Umpan

4. Kesimpulan

Pada bukaan katup regulator sebesar 25%, terbentuk hidrat pada celah katup dan outlet regulator. Hidrat pada celah katup dapat tersapu oleh kecepatan gas yang tinggi yaitu 400 m/s sedangkan hidrat pada outlet dapat menyebabkan penyumbatan karena kecepatan gas hanya 0,05 m/s. Pada bukaan 25%, 30%, dan 50%, hanya bukaan

50% yang mampu menghindarkan pembentukan hidrat meskipun tekanan outlet yang dihasilkan adalah 120 bar sedangkan tekanan outlet yang diinginkan hanya 70 bar. Pemanasan gas umpan sebesar 25°C (25 K) mampu mencegah pembentukan hidrat pada regulator dengan bukaan katup sebesar 25%. Injeksi metanol sebesar minimal 2%-wt dari laju alir gas umpan mampu menghilangkan potensi terbentuknya hidrat pada gas umpan 40°C (313 K) dan bukaan katup 25%.

Daftar Pustaka

Anthony, I.; Charley, A.; Emmanuel, A.; Boniface, O.; Chinedu, U.; Chukwuemeka, M., Flow Assurance Analyses for Optimum Pipeline Transportation of Gas for Use in CNG Vehicles in Nigeria. *Petroleum Science and Engineering*, 2019, **3**(1), 17.

Bird, R.B.; Stewart, W.E.; E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

Duan, X.; Shi, B.; Wang, J.; Song, S.; Liu, H.; Li, X.; Chen, Y.; Liao, Q.; Gong, J.; Chen, S.; Diao, F., Simulation of the Hydrate Blockage Process in a Water-Dominated System via the CFD-DEM Method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, **96**, 104241.

Fang, X.; Wang, G.; Zhong, L.; Qiu, S.; Wang, D., Adaptability Analysis of Operating Parameters of Hydrate Hydrocyclone Separator Based on a CFD Simulation. *Separation Science and Technology*, 2022, **57**, 979–989.

Feijoo, F.; Iyer, G.C.; Avraam, C.; Siddiqui, S.A.; Clarke, L.E.; Sankaranarayanan, S.; Binsted, M.T.; Patel, P.L.; Prates, N.C.; Torres-Alfaro, E.; Wise, M.A., The Future of Natural Gas Infrastructure Development in the United States. *Applied Energy*, 2018, **228**, 149–166.

Glaun, A.; Shahda, J., Prevent Methane Hydrate Formation in Natural Gas Valves. *Hydrocarbon Processing*, May 2013. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A332383242/AONE?u=anon~bbce2462&sid=googleScholar&xid=a5348b8c. Diakses pada 3 April 2022.

Jacomel, F.C.; Sirino, T.H.; Marcelino Neto, M.A.; Bertoldi, D.; Morales, R.E.M., Loss of Methanol and Monoethylene Glycol in VLE and LLE: Prediction of Hydrate Inhibitor Partition. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2019, **64**, 3889–3903.

Jozian, S.; Vafajoo, L., Mathematical Modeling of the Gas Hydrate Formation in a 90 Elbow Utilizing CFD Technique. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, **70**, 2167–2172.

Kazda, K.; Tomaszgard, A.; Nørstebø, V.; Li, X., Optimal Utilization of Natural Gas Pipeline Storage Capacity Under Future Supply Uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 2020, **139**, 106882.

Kiran, B.S.; Prasad, P.S.R., Inhibition of Methane Hydrates Using Biodegradable Additives. *ACS Omega*, 2021, **6**, 8261–8270.

Lauder, B.E.; Spalding, D.B., The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, **3**, 269–289.

Liu, Z.; Yang, M.; Zhang, H.; Xiao, B.; Yang, L.; Zhao, J., A High-Pressure Visual Flow Loop for Hydrate Blockage Detection and Observation. *Review of Scientific Instruments*, 2019, **90**, 074102.

Qiu, S.; Wang, G.; Wang, L.; Fang, X., A Downhole Hydrocyclone for the Recovery of Natural Gas Hydrates and Desanding: The CFD Simulation of the Flow Field and Separation Performance. *Energies*, 2019, **12**(17), 3257.

Sen, D.; Günay, M.E.; Tunç, K.M.M., Forecasting Annual Natural Gas Consumption Using Socio-Economic Indicators for Making Future Policies. *Energy*, 2019, **173**, 1106–1118.

Umuteme, O.M., Computational Fluid Dynamics (CFD) Transient Pressure and Temperature Simulation of a Natural Gas–Hydrogen Gas Blend Transportation Pipeline. *International Journal of Innovative Research and Development*, 2020, **9**, 112–116.

Wang, Z.; Zhao, Y.; Zhang, J.; Pan, S.; Yu, J.; Sun, B., Flow Assurance During Deepwater Gas Well Testing: Hydrate Blockage Prediction and Prevention. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, **163**, 211–216.