

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

Modelling and Simulation Natural Gas Liquefaction with Peng Robinson Equation of State

Lidya Elizabeth^{1*}, Okky Indra Putra², Marthen Luther Doko²

¹Politeknik Negeri Bandung, D3 Teknik Kimia, Indonesia

²Institut Teknologi Nasional Bandung, Teknik Kimia, Indonesia

*correspondence email: lidya.elizabeth@polban.ac.id

Received: 12/01/2021; Revised: 24/03/2021; Accepted: 07/04/2021;

doi: 10.25273/cheesa.v4i1.8316.18-30

Abstrak

Gas alam merupakan energi yang ramah lingkungan dibandingkan batu bara dan minyak bumi. Pencairan gas alam memudahkan pengangkutan pada jarak jauh. Tujuan pemodelan dan simulasi pencairan gas alam ini yaitu mengetahui pengaruh temperatur dan tekanan pada masukan kompresor. Simulasi dilakukan secara statis dan dinamis. Metode simulasi pencairan gas alam menggunakan perangkat Matlab dengan persamaan keadaan Peng Robinson dan aturan campuran (*mixing rules*). Pemodelan statis dilakukan pada temperatur masukan gas alam 298 K dan tekanan 20 atm. Hasil simulasi menunjukkan gas alam mengalami pencairan pada siklus kedua. Temperatur gas alam siklus pertama mencapai 182 K sedangkan kedua 112 K. Pemodelan dinamis memvariasikan temperatur masukan kompresor pada komposisi gas alam tetap dan variasi komposisi gas metana pada temperatur masukan kompresor tetap. Hasil menunjukkan semakin tinggi temperatur masukan kompresor, semakin tinggi temperatur keluaran kompresor akhir dan *throttling valve*. Pada variasi komposisi gas metana, semakin besar komposisi gas metana maka semakin rendah suhu keluaran kompresor.

Kata kunci: gas alam; LNG; pemodelan; persamaan Peng Robinson; simulasi

Abstract

Natural gas is environmentally friendly energy compared with coal and petroleum. Natural gas liquefaction is carried out to facilitate transportation over long distances. The objective of modelling and simulation natural gas liquefaction was to determine the effect of temperature and pressure on compressor inlet. Simulations were carried out both static and dynamic. The simulation method uses Matlab instrument with Peng Robinson equation of state and mixing rules. Static modelling carried out at inlet natural gas temperature 298 K and pressure 20 atm. The simulation results showed that natural gas liquefied in the second cycle. The temperature of natural gas in the first cycle reached 182 K while second cycle 112 K. Dynamic modelling carried out by varying the compressor inlet temperature with fixed natural gas composition and composition of methane gas variation at fixed compressor inlet temperature. The results showed that the higher compressor inlet temperature, the higher outlet temperature of final compressor and throttling valve. Meanwhile, in the variation of methane gas composition, the higher methane gas composition, the lower compressor outlet temperature.

Keywords: LNG; modelling; natural gas; Peng Robinson equation; simulation

1. Pendahuluan

Bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara dan gas alam diproyeksikan akan terus memenuhi 75% kebutuhan konsumsi energi global sampai tahun 2040 [1]. Pada tahun 2018, produksi minyak bumi 38,44 juta ton, batu bara 557,77 juta ton dan gas alam 68,26 juta ton [2]. Batu bara merupakan sumber energi fosil yang jumlahnya terbanyak, tetapi gas alam relatif lebih ramah lingkungan. Sedangkan minyak bumi yang jumlahnya lebih sedikit dari gas alam, harganya cenderung tidak stabil. Oleh karena itu, gas alam merupakan salah satu sumber energi yang sangat menjanjikan.

Gas alam merupakan salah satu sumber energi ataupun bahan baku pada proses produksi. Misalnya saja sebagai bahan bakar *boiler* di furnace, reformer, bahan baku produksi amoniak, metanol dan sebagainya [3]. Gas alam berharga murah, ramah lingkungan, aman dan sumber energi yang bermanfaat dibandingkan bahan bakar lainnya, serta mengeluarkan produk samping yang lebih sedikit saat dibakar [4]. Gas alam juga merupakan sumber energi yang sangat efisien untuk dikonversi menjadi energi pembangkit listrik [5].

Gas alam terdiri dari gas-gas hidrokarbon (C_nH_{2n+2}) dengan penyusun utama gas metana. Selain itu gas alam juga mengandung etana, propana, butana, pentana dan gas-gas yang mengandung sulfur. Pada keadaan murni, gas alam tidak berwarna, tidak berbentuk dan tidak berbau [6]. Gas alam yang berasal dari Indonesia diolah menjadi produk LNG (*liquefied natural gas*) dan LPG (*liquefied petroleum gas*). Dua produk tersebut adalah bahan bakar utama perindustrian seperti petrokimia dan rumah tangga. Sisa dari pencairan gas alam ini berupa kondensat [7].

Gas alam memiliki beberapa gas pengotor diantaranya CO_2 , H_2S dan merkaptan. Gas alam mentah mengandung CO_2 sekitar 20%-mol yang membuat gas alam tidak ekonomis [8]. Gas CO_2 tidak diinginkan karena mengandung racun pada katalis untuk sintesis amoniak dan metanol, mengurangi nilai bakar dari gas alam serta dapat menjadi padat (*icing*) saat proses pencairan gas alam [3]. Berbagai teknologi pemisahan CO_2 dari gas alam seperti absorpsi fisik dan kimia, pemisahan kriogenik dan pemisahan membran dilakukan agar dapat memenuhi kriteria transpor perpipaan dan atau proses likuifaksi untuk LNG [8].

Pada jarak dekat, gas alam ditransportasikan melalui perpipaan. Sedangkan untuk jarak jauh, gas alam ditransportasikan melalui lautan dalam bentuk *liquefied natural gas* (LNG) menggunakan tanki-tanki LNG yang terinsulasi kriogenik [9]. Ada berbagai cara untuk mengolah sumber gas alam tergantung dari lokasi, jumlah dan kualitasnya. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa transportasi gas alam melalui perpipaan tidak ekonomis atau tidak layak ketika jaraknya lebih dari 200 km [10]. Gas alam diubah fasanya menjadi *liquefied natural gas* (LNG) untuk memudahkan penyimpanan dan pendistribusian pada jarak jauh. Kemudian LNG dipanaskan dan dilakukan regasifikasi menjadi fasa gas kembali untuk permintaan sampai pada pelanggan [11]. Pemisahan LNG dari sumber gas alam dilakukan berdasarkan prinsip absorpsi, ekspansi Joule-Thompson (JT), refrigerasi eksternal atau ekspansi turbo. Pada banyak kasus, kombinasi dari operasi-operasi ini dapat meningkatkan efisiensi energi dan jumlah produk. Pemilihan proses bergantung dari banyak faktor seperti komposisi gas, target

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

kandungan panas gas serta kemampuan untuk meningkatkan jumlah produk sesuai spesifikasi yang diinginkan [1].

Likuifaksi gas alam dilakukan dalam kondisi kriogenik. Batasan kondisi kriogenik yaitu temperatur didih metana sekitar $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ (111 K) pada tekanan atmosfer (101,325 kPa). Metana adalah komponen utama LNG yaitu sekitar 90% pada *heavy* LNG dan 95% pada *light* LNG. Hal ini yang menyebabkan temperatur didih LNG mendekati temperatur didih metana murni [12].

Selama proses likuifaksi, volume gas alam berkurang dengan rasio 1/600. Pada kondisi ini, *liquefied natural gas* (LNG) dapat ditransportasikan dengan kapal-kapal dan disimpan di dalam tanki penyimpanan. Proses selanjutnya, LNG dipompa pada tekanan yang diinginkan dan diubah menjadi fasa uap. Fasa uap dari gas alam ini ditransfer ke dalam sistem perpipaan. Produksi LNG merupakan proses yang mengkonsumsi energi cukup besar [12]. LNG ini merupakan bahan bakar kriogenik yang memiliki perbedaan temperatur yang cukup besar dengan lingkungan luarnya. Pada saat pemakaian, berdasarkan faktor lingkungan dan kondisi operasinya, LNG akan berubah menjadi gas secara bertahap serta menjadi BOG yang terapung (*boil off gas*) pada bagian atas dari tanki penyimpanan. Hal ini akan meningkatkan tekanan dari tanki penyimpanan [13]. Sejumlah energi dikonsumsi pada pabrik LNG untuk melikuifaksi gas alam. Ketika regasifikasi LNG dilakukan, sejumlah besar energi yang disebut energi 'cold' atau kriogenik' dilepaskan [14].

Proses pencairan gas alam menjadi LNG dioperasikan pada tekanan yang lebih tinggi dan temperatur lebih rendah dibandingkan proses pengolahan gas alam lainnya. Oleh karena itu, tercapainya

efisiensi energi dan keamanan proses sangat penting dilakukan [15]. Berdasarkan kondisi gas bumi dan spesifikasi produk LNG, proses pencairan gas bumi pada kilang LNG terdiri dari pemisahan gas CO_2 , pemisahan air, pemisahan hidrokarbon berat dan pencairan gas bumi [16].

Adapun tujuan simulasi proses pencairan gas alam adalah mengetahui pengaruh parameter fisik, terutama temperatur dan tekanan proses. Pembuatan simulasi dan pemodelan pencairan gas alam dengan perangkat Matlab ini memungkinkan pembelajaran likuifaksi gas alam secara komprehensif. Keuntungan simulasi ini dalam penggunaan *software* matlab yaitu kegagalan/*error* simulasi dapat ditelusuri dengan detail pada perangkat Matlab (karena persamaan perhitungan disusun sendiri), sedangkan pada perangkat lainnya, perhitungan persamaan keadaan Peng Robinson dan lainnya sudah terpasang sehingga sulit ditelusuri bagian mana dan mengapa *error* terjadi.

2. Metode Penelitian

Simulasi pencairan gas alam dilakukan dengan perangkat lunak Matlab. Sebelum program dijalankan, beberapa data yang perlu dimasukkan diantaranya:

- konstanta tetap proses seperti R (konstanta persamaan gas), P_c (tekanan kritik tiap komponen gas), T_c (temperature kritik tiap komponen gas), ω (nilai asentrik tiap komponen gas), dan A, B, C, D (konstanta dari persamaan kapasitas panas).
- nilai kondisi proses meliputi T1 (suhu masukan kompresor), P1 (tekanan masukan kompresor) dan x (konsentrasi tiap komponen gas).

Gas alam terdiri dari berbagai campuran gas dengan karakteristik yang berbeda. Karakteristik yang menjadi

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

parameter utama dalam pemodelan pencairan gas alam adalah temperatur dan tekanan. Pemodelan pencairan gas alam dilakukan dengan prinsip siklus likuifaksi dengan metode yang didasarkan atas persamaan keadaan Peng Robinson dan aturan campuran (*mixing rules*). Persamaan keadaan Peng Robinson dipilih karena adanya persamaan ‘kubik’ yang dibutuhkan dan dapat merepresentasikan sistem termodinamika berupa fasa cair dan uap. Hal ini ditunjukkan dengan adanya parameter tambahan yaitu faktor asentrik (ω) [17]. Metode yang digunakan untuk

penghitungan iterasi menggunakan metode *Newton Raphson*.

Persamaan keadaan Peng Robinson dalam bentuk fungsi dari faktor kompresibilitas, yaitu pada persamaan (1). Menurut Sandler [18], persamaan entalpi residu dan entropi residu untuk persamaan keadaan Peng-Robinson disusun ulang seperti pada persamaan (2). Sedangkan menurut Kyle [19], persamaan residu untuk entalpi dan entropi disederhanakan menjadi pada persamaan (3).

$$Z^3 - \left(\frac{bP}{RT} - 1\right)Z^2 - \left(\frac{\alpha a P}{R^2 T^2} - 3\frac{b^2 P^2}{R^2 T^2} - 2\frac{bP}{RT}\right)Z - \left(\frac{\alpha ab P^2}{R^3 T^3} - \frac{b^2 P^2}{R^2 T^2} - \frac{b^3 P^3}{R^3 T^3}\right) = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$H^R = H - H^{ig} = (Z - 1)RT + \frac{T\left(\frac{da}{dT}\right) - a}{2\sqrt{2}b} \ln \frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \dots\dots\dots(2a)$$

$$S^R = S - S^{ig} = R \ln(Z - B) + \frac{\left(\frac{da}{dT}\right)}{2\sqrt{2}b} \ln \frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \dots\dots\dots(2b)$$

$$S^R = S - S^{ig} = R \left[\ln(Z - B) - 2,078 \left(\frac{1 + \kappa}{\sqrt{T_r}} - \kappa \right) \sqrt{\alpha} \ln \frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \right] \dots\dots\dots(3a)$$

$$H^R = H - H^{ig} = RT_c \left[(Z - 1)T_r - 2,078(1 + \kappa) \sqrt{\alpha} \ln \frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \right] \dots\dots\dots(3b)$$

Untuk campuran gas, nilai parameter persamaan keadaan Peng Robinson menjadi seperti pada persamaan (4) dan (5). Komposisi gas alam yang digunakan pada simulasi ini disajikan pada Tabel 1.

$$a_m = \sum_i \sum_j y_i y_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - \bar{k}_{ij}) \dots\dots\dots(4)$$

$$b_m = \sum_i y_i b_i \dots\dots\dots(5)$$

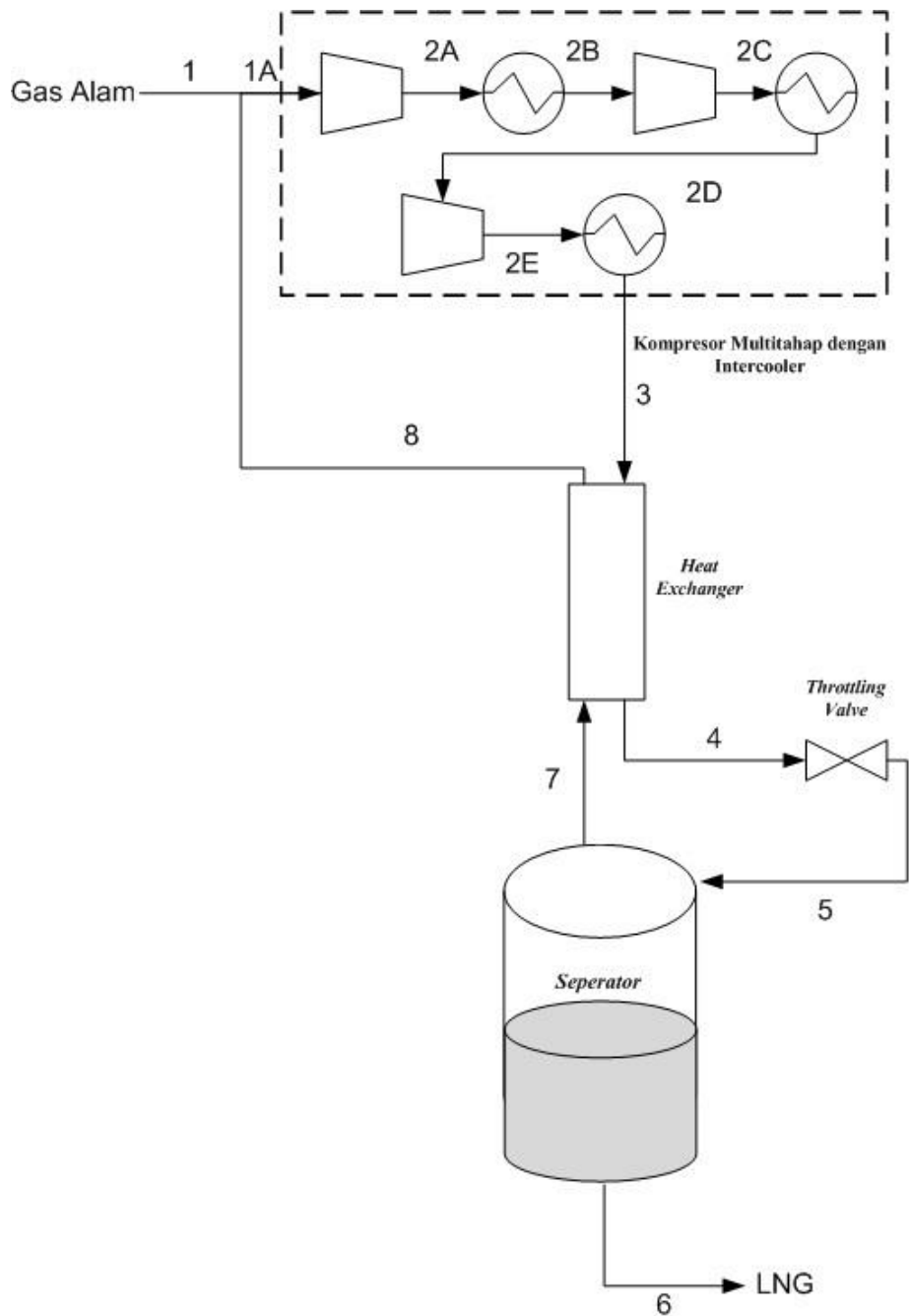
Simulasi pencairan gas alam dilakukan menggunakan metode *Ekspansi Joule-Thompson*. Metode ini melibatkan tiga alat utama yang menjadi fokus pada pencairan gas alam yaitu kompresor, unit *heat exchanger* dan *throttling valve*. Skema pencairan gas alam disajikan pada Gambar 1. Adapun tahapan simulasi pencairan gas alam disajikan pada Gambar 2-5.

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

Tabel 1 Komposisi Gas Alam

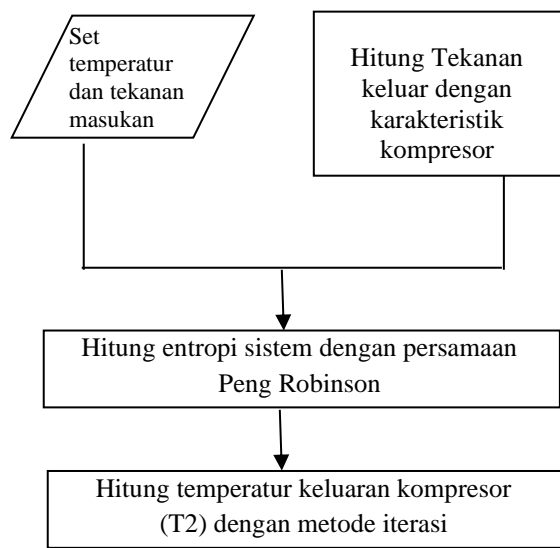
No	Senyawa	Komposisi (%-mol)		
		Acuan ^[20]	Contoh ^[20]	Penelitian ini
1	metana	min.63	71,161	81,54
2	etana	max.10	9,245	6,62
3	propana	max.5	8,723	6,21
4	iso-butana	max.10	1,3705	1,64
5	n-butana		1,805	2,42
6	iso-Pentana		0,4083	0,88
7	n-Pentana	max.2	0,3156	0,6
8	heksana		0,3078	0,09

sumber: Khairunisa *dkk.* [20]

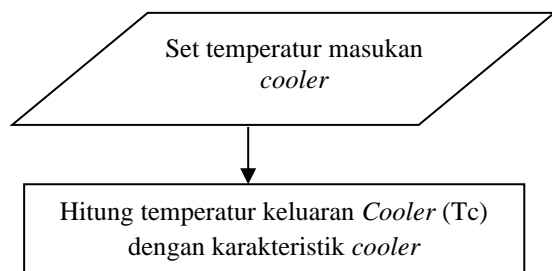


Gambar 1. Skema Pencairan Gas Alam

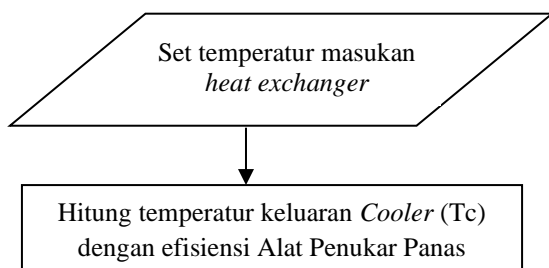
Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson



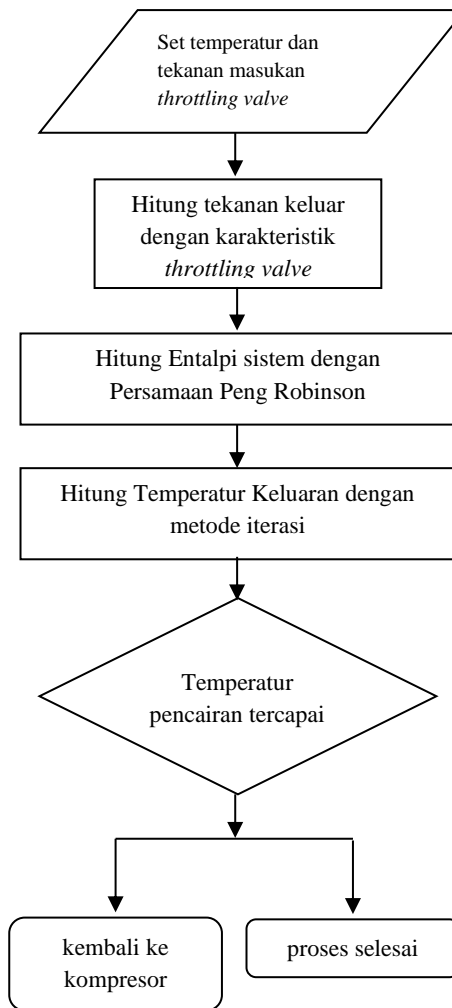
Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan Proses dari 1A ke 2E



Gambar 3. Diagram Alir Perhitungan proses dari 2E ke 3



Gambar 4. Diagram Alir Perhitungan Proses dari 3 ke 4



Gambar 5. Diagram Alir Perhitungan Proses pada *throttling valve*

Pada proses pemrograman, nilai *Tout heat exchanger* (T4) pada siklus 1 telah ditentukan yaitu sama dengan nilai T1 (temperatur masuk kompresor 1). Nilai tersebut disajikan pada Tabel 2. Sedangkan rasio kompresor pada proses pemrograman ini adalah 2:2:3 dari kompresor 1 sampai 3. Data tekanan (Pout) target disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2 Temperatur pada T1 dan T4

Run	T1 (Kelvin)	T4 (Kelvin)
1	277	277
2	283	283
3	288	288
4	293	293
5	298	298

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

Tabel 3 Tekanan pada kompresor

Tekanan	Nilai (atm)
P1A	20
P2A	40
P2C	80
P2E	240

3. Rancangan Simulasi

Secara umum, rancangan simulasi pencairan gas alam ini didasarkan pada persamaan neraca energi. Persamaan neraca energi yang digunakan berupa neraca entropi dan entalpi untuk mendapatkan suhu keluaran dari masing-masing alat, dari awal proses pada kompresor, sampai akhir proses pada *throttling valve*. Berikut penguraian fungsi entropi dan entalpi tersebut berdasarkan persamaan keadaan gas nyata Peng Robinson.

- Fungsi entropi

Fungsi entropi dapat ditulis sebagai

$$F(T) = \Delta S = S_2^R + \Delta S_{\text{sig}} - S_1^R \dots\dots\dots(6)$$

Smith *dkk.* [21]

Apabila diuraikan, persamaan (6) ini menjadi

$$F(T)_{\text{entropi}} = \frac{S_2^R}{R} + \frac{1}{R} \int_{T_1}^T \frac{C_p^{ig}}{T} dT - \ln \frac{P_2}{P_1} - \frac{S_1^R}{R} = 0$$

.....(7) Smith *dkk.* [21]

Dari persamaan (7) nilai yang sudah bisa ditentukan adalah $\frac{S_1^R}{R}$ (disebut F1) dan $\ln \frac{P_2}{P_1}$ (disebut F2) sedangkan $\frac{S_2^R}{R}$ dan $\frac{1}{R} \int_{T_1}^T \frac{C_p}{T} dT$ yang merupakan fungsi temperatur dianggap sebagai subfungsi yaitu FT1 dan FT2. Dari persamaan (7) dibagi menjadi:

$$FT1 = \frac{S_2^R}{R}$$

$$FT2 = \frac{1}{R} \int_{T_1}^T \frac{C_p^{ig}}{T} dT$$

$$F2 = \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$F1 = \frac{S_1^R}{R}$$

Persamaan entropi keseluruhan menjadi $F(T) = FT1 + FT2 - F2 - F1$. Masing-masing fungsi ini diuraikan lebih rinci pada persamaan (8). Nilai FT1 ditentukan berdasarkan persamaan entropi residual.

$$F(T)_{\text{entropi}} = \ln \left(Z - \frac{B_1}{T} \right) - \left(\frac{D_1}{\sqrt{T}} - D_2 + D_3 \sqrt{T} \right) \ln \frac{ZT + 2,4142B_1}{ZT - 0,4142B_1} + a_0 \ln T + a_1 T + \frac{a_2}{2} T^2 + \frac{a_3}{3} T^3 - Cpa - F_1 - F_2 \dots\dots\dots(8)$$

Fungsi entropi sebagai fungsi temperatur di atas digunakan untuk menghitung suhu keluaran kompresor dengan cara iterasi fungsi entropi dan fungsi Z (faktor kompresibilitas) persamaan keadaan gas nyata Peng Robinson.

- Fungsi Entalpi

Fungsi entalpi pada simulasi pencairan gas alam dipakai untuk menghitung suhu keluaran dari kompresor dan *throttling valve*. Secara umum fungsi entalpi dapat ditulis

$$F(T) = \frac{H_2^{ig}}{R} + \frac{H_2^R}{R} - \frac{H_1^R}{R} \dots\dots\dots(9)$$

Smith *dkk.* [21]

Apabila diuraikan persamaan (9) menjadi

$$F(T) = \frac{1}{R} \int_{T_1}^T C_p^{ig} dT + \frac{H_2^R}{R} - \frac{H_1^R}{R} \dots\dots\dots(10)$$

Smith *dkk.* [21]

Nilai yang sudah bisa ditentukan adalah $\frac{H_1^R}{R}$ yang selanjutnya akan dianggap konstanta, F3 sedangkan $\frac{H_2^{ig}}{R}$ dan $\frac{H_2^R}{R}$ yang merupakan fungsi temperatur dianggap sebagai subfungsi yaitu FT3 dan FT4. Fungsi FT3 merupakan fungsi $\frac{H_2^{ig}}{R}$. Apabila dijabarkan, persamaannya dapat ditulis menjadi

$$\frac{H_2^{ig}}{R} = \frac{1}{R} \int_{T_1}^T C_p^{ig} dT \dots\dots\dots(11)$$

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

C_p^{ig} merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan sebagai:

$$C_p^{ig} = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Kemudian untuk suatu campuran berlaku: $C_p^{ig}_{mix}$

$$\begin{aligned} C_p^{ig}_{mix} &= \sum x_i C_p^{ig}_i \\ &= \sum x_i (A + BT + CT^2 + DT^3) \\ &= \sum x_i A + \sum x_i BT \\ &+ \sum x_i CT^2 + \sum x_i DT^3 \\ &= \sum x_i A + T \sum x_i B \\ &+ T^2 \sum x_i C + T^3 \sum x_i D \\ &= a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} a_0 &= \sum x_i A, \\ a_1 &= \sum x_i B, \\ a_2 &= \sum x_i C, \text{ dan} \\ a_3 &= \sum x_i D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \int_{T_1}^T C_p^{ig} dT &= \int_{T_1}^T (a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3) dT \\ &= a_0 T + \frac{a_1}{2} T^2 + \frac{a_2}{3} T^3 + a_3 T^3 - C_{pb} \end{aligned}$$

dengan $C_{pb} = a_0 T_1 + \frac{a_1}{2} T_1^2 + \frac{a_2}{3} T_1^3 + a_3 T_1^3$

Fungsi FT4 merupakan fungsi $\frac{H_2^R}{R}$.

Nilai $\frac{H_2^R}{R}$ dijabarkan menjadi

$$\begin{aligned} \frac{H^R}{R} &= T_c (Z - 1) T_r - 2,0778 T_c (1 + \kappa) \sqrt{\alpha} \ln \frac{Z + (1 + \sqrt{Z}) B}{Z + (1 - \sqrt{Z}) B} \dots\dots(11) \end{aligned}$$

dengan nilai konstanta B pada Persamaan Keadaan Peng Robinson yaitu:

$$B = 0,0778 \frac{P_r}{T_r} = 0,0778 \frac{P_r}{T} T_c,$$

misal $B_1 = 0,0778 P_r T_c$, sehingga: $B = \frac{B_1}{T}$

$$T_c (Z - 1) T_r = T_c (Z - 1) \frac{T}{T_c} = (Z - 1) T$$

$$\begin{aligned} T_c 2,078 (1 + \kappa) \sqrt{\alpha} &= T_c 2,078 (1 + \kappa) (1 + \kappa - \kappa \sqrt{T_r}) \\ &= T_c 2,078 (1 + \kappa)^2 - \frac{T_c 2,078 (1 + \kappa) \kappa}{\sqrt{T_c}} \sqrt{T} \dots\dots(12) \end{aligned}$$

Misal:

$$V_1 = T_c 2,078 (1 + \kappa)^2 \text{ dan}$$

$$V_2 = \frac{T_c 2,078 (1 + \kappa) \kappa}{\sqrt{T_c}}, \text{ maka:}$$

$$T_c 2,078 (1 + \kappa) \sqrt{\alpha} = V_1 - V_2 \sqrt{T}$$

Dari penguraian di atas maka persamaan (12) disusun ulang menjadi

$$\begin{aligned} \frac{H^R}{R} &= (Z - 1) T - (V_1 - V_2 \sqrt{T}) \ln \frac{Z + 2,4142 \frac{B_1}{T}}{Z - 0,4142 \frac{B_1}{T}} \dots\dots(13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{H^R}{R} &= (Z - 1) T - (V_1 - V_2 \sqrt{T}) \ln \frac{Z T + 2,4142 B_1}{Z T - 0,4142 B_1} \dots\dots(14) \end{aligned}$$

Konstanta F3 merupakan konstanta $\frac{H_1^R}{R}$ yang nilainya dihitung dengan persamaan (14) dengan nilai T adalah temperatur awal. Dari penurunan fungsi F3, FT3 dan FT4 maka dari persamaan entropi disusun ulang fungsi keseluruhan menjadi persamaan (15).

$$\begin{aligned} F(T)_{entropi} &= a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + (Z - 1) - (V_1 - V_2 \sqrt{T}) \frac{-2,8284 B_1 Z}{Z^2 T^2 + 2 Z B_1 T - B_1^2} + \frac{-V_2}{2 \sqrt{T}} \ln \frac{Z T + 2,4142 B_1}{Z T - 0,4142 B_1} \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

4. Hasil dan Pembahasan

Simulasi pencairan gas alam dengan bahasa pemrograman matlab dilakukan dengan menguraikan tahapan perhitungan persamaan termodinamika pada masing-masing alat. Perhitungan tersebut dibuat dalam bentuk fungsi-fungsi matlab satu per satu secara bertahap dari kompresor sampai *throttling valve*. Simulasi yang dijalankan telah berhasil menunjukkan pencairan gas

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

alam dengan menggunakan pemodelan statis. Pemodelan statis ini menggunakan hukum termodinamika untuk menghitung keadaan gas alam keluaran dari proses di setiap tahap operasi. Pemodelan statis ini menggunakan temperatur masukan gas alam 298 K dan tekanan 20 atm.

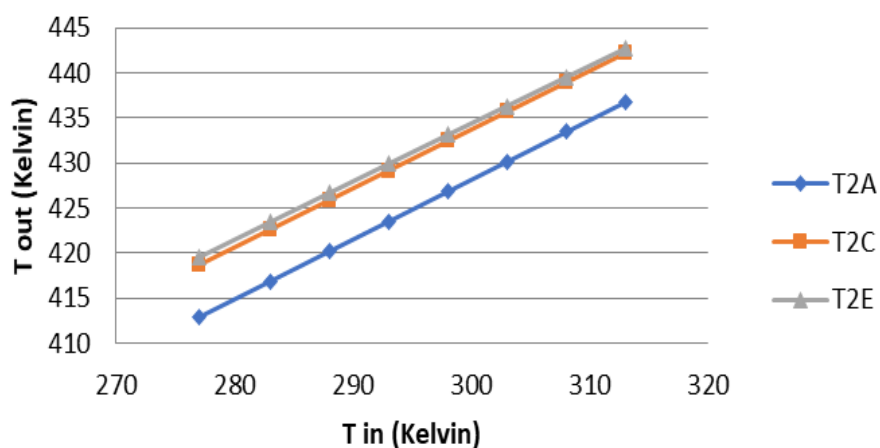
Hasil simulasi dengan model statis menunjukkan bahwa gas alam mengalami pencairan pada siklus kedua. Siklus pertama hanya menurunkan temperatur gas alam sampai temperatur 182 K. Pada siklus kedua, temperatur telah turun sampai melewati temperatur pencairan gas alam yaitu 112 K.

Setelah simulasi dengan pemodelan statis berhasil, dilanjutkan dengan pemodelan dinamis dengan menggunakan variasi temperatur masukan kompresor pada komposisi gas alam tetap dan variasi komposisi gas metana pada temperatur masuk kompresor tetap. Hasil simulasi disajikan dalam beberapa grafik untuk menunjukkan pengaruh temperatur masukan dan komposisi gas metana pada pemodelan.

Kurva pada Gambar 6 dan 7 menunjukkan bahwa pada *multistage* kompresor, kenaikan temperatur akan bertambah dari satu kompresor ke kompresor berikutnya dikarenakan adanya

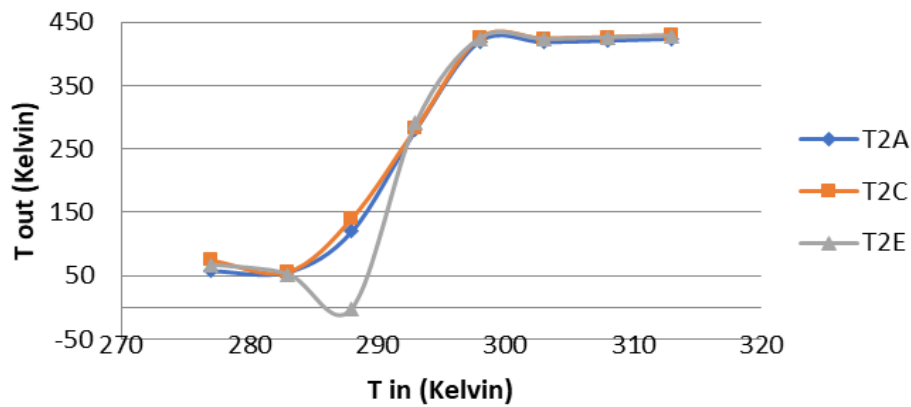
peningkatan tekanan. Temperatur pada keluaran kompresor 1 (T2A) meningkat seiring dengan kenaikan temperatur masukan kompresor baik pada siklus 1 maupun siklus 2. Namun pada siklus kedua terjadi sedikit penyimpangan perubahan temperatur yaitu pada temperatur keluaran kompresor 3 (T2E). Hal ini dapat disebabkan oleh kurang akuratnya data K_i (konstanta kesetimbangan) sehingga perubahan temperatur yang signifikan menyebabkan penyimpangan pada hasil perhitungan program.

Salah satu hal yang ingin dicapai pada proses desain dan operasi pencairan gas alam adalah meminimalisasi konsumsi energi pada kompresor. Hasil simulasi pencairan gas alam dengan empat *stage* kompresor memberikan hasil kisaran daya kompresor 200-438 kW [22]. Sedangkan simulasi dan pemodelan pencairan gas alam pada penelitian ini menghasilkan daya kompresor pada kisaran 200-350 kW dengan tiga *stage* kompresor (disajikan pada Gambar 8). Penelitian ini memungkinkan proses yang lebih efektif tetapi perlu dilakukan validasi data serta kajian lebih dalam karena kondisi simulasi dan jenis program yang digunakan berbeda.

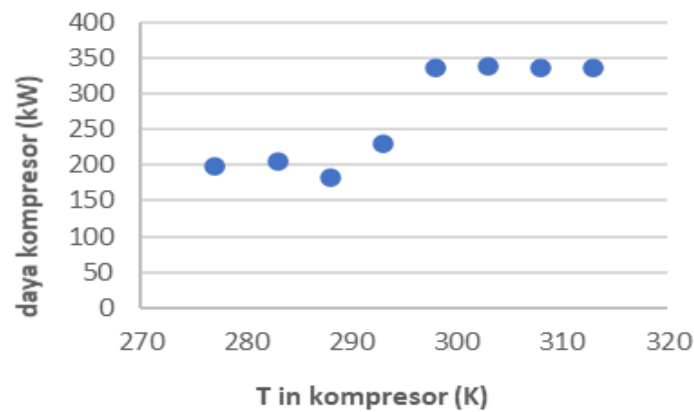


Gambar 6. Kurva Tin dengan Tout kompresor (siklus 1)

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson



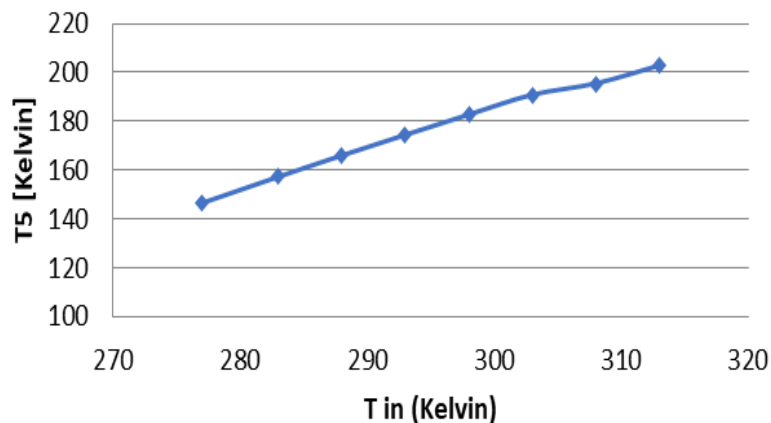
Gambar 7. Kurva Tin dengan Tout kompresor (siklus 2)



Gambar 8. Kurva Tin kompresor dengan daya kompresor

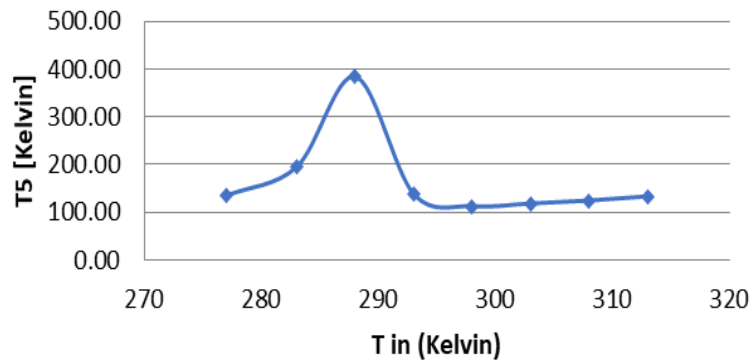
Pada Gambar 9 dan 10 terlihat bahwa T5 (temperatur keluaran *throttling valve*) bernilai semakin besar dengan adanya peningkatan Tin kompresor. Namun, ada penyimpangan pada siklus 2 yang cukup ekstrim yaitu pada suhu Tin kompresor 288 K, suhu T5 (suhu keluaran *throttling valve*) yang malah meningkat sampai 384,5 K.

Penyimpangan ini dapat disebabkan karena faktor kompresibilitas gas nyata Peng Robinson merupakan persamaan pangkat tiga yang memiliki nilai akar-akar yang bervariasi dan membuat perhitungan program menjadi sensitif.



Gambar 9. Kurva Tin kompresor dengan T5 (T keluaran *throttling valve*) [siklus 1]

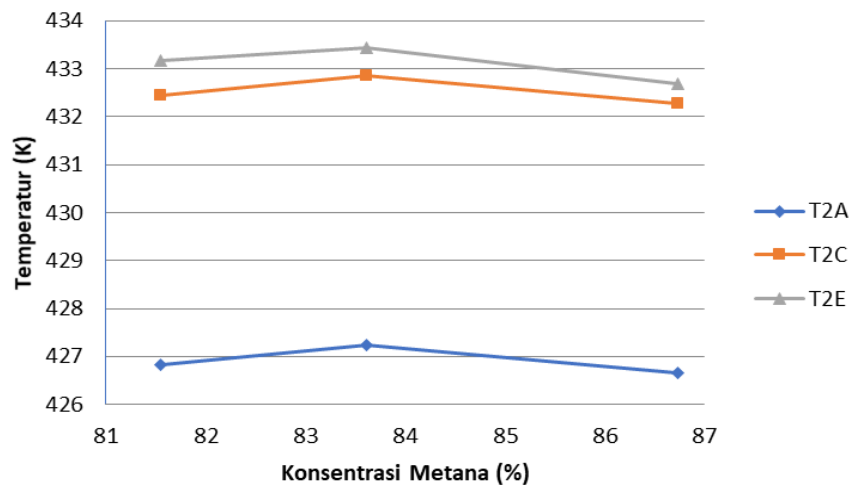
Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson



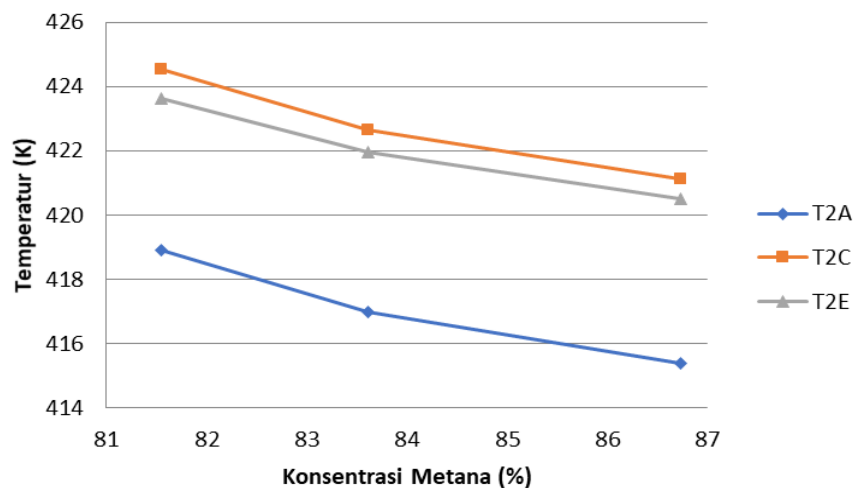
Gambar 10. Kurva Tin kompresor dengan T5 ($T_{\text{keluaran throttling valve}}$) [siklus 2]

Gambar 11 dan 12 menunjukkan pengaruh komposisi metana terhadap temperatur keluaran kompresor. Pada siklus pertama pengaruh komposisi pada temperatur keluaran tidak terlalu terlihat seperti pada siklus kedua. Siklus kedua menunjukkan bahwa semakin besar komposisi metana dalam gas alam,

temperatur keluaran kompresor semakin rendah. Hal ini dapat disebabkan temperatur didih metana paling rendah dibandingkan gas alam lainnya sehingga semakin besar komposisinya maka akan semakin rendah temperaturnya.



Gambar 11. Kurva komposisi metana terhadap temperatur keluaran kompresor (siklus 1)



Gambar 12. Kurva komposisi metana terhadap temperatur keluaran kompresor (siklus 2)

5. Kesimpulan

Simulasi pencairan gas alam dengan pemodelan statis pada temperatur masukan kompresor 298 K dan tekanan masuk 20 atm memerlukan dua siklus dengan temperatur keluaran pada 112 K. Simulasi pencairan gas alam dengan pemodelan dinamis menunjukkan pengaruh temperatur masukan kompresor dan komposisi gas alam pada temperatur keluaran proses pencairan gas alam. Kondisi operasi

optimum pencairan gas alam dicapai pada 298 K dan tekanan 20 atm. Selain itu, semakin besar komposisi metana maka semakin rendah temperatur keluaran kompresor. Data konstanta kesetimbangan perlu dicari lebih lengkap agar tidak terjadi penyimpangan dan kesalahan perhitungan. Selain itu, perlu dilakukan simulasi pencairan gas alam dengan menggunakan bahasa pemrograman lain sebagai perbandingan.

Daftar Rujukan

- [1] AlNouss, A., Ibrahim, M., & Al-Sobhi, S. A. (2018). Potential energy savings and greenhouse gases (GHGs) emissions reduction strategy for natural gas liquid (NGL) recovery: Process simulation and economic evaluation. *Cleaner Production*, 194, 525–539, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.107
- [2] Setiawan, A., Wibowo, A. P., & Rosyid, F. A. (2020). Analisis Pengaruh Ekspor dan konsumsi Batubara terhadap Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. *Teknologi Mineral dan Batubara*, 16 (2), 109–124, doi:10.30556/jtmb.Vol16.No2.2020.1081
- [3] Fatimura, M., & Fitriyanti, R. (2018). Penanganan Gas Asam (Sour Gas) Yang Terkandung Dalam Gas Alam Menjadi Sweetening Gas. *Redoks*, 3(2), 55, doi: 10.31851/redoks.v3i2.2390
- [4] Nakhjiri, A. T., Heydarinasab, A., Bakhtiari, O., & Mohammadi, T. (2020). Numerical simulation of CO₂/H₂S simultaneous removal from natural gas using potassium carbonate aqueous solution in hollow fiber membrane contactor. *Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104130, doi: 10.1016/j.jece.2020.104130
- [5] Park, J., You, F., Mun, H., & Lee, I. (2021). Liquefied natural gas supply chain using liquid air as a cold carrier: Novel method for energy recovery. *Energy Conversion and Management*, 227, 113611, doi:10.1016/j.enconman.2020.113611
- [6] Fahmi, M., Fauzi, M., & Wibawa, G. (2013). Studi Awal Desain LNG (Liquefied Natural Gas) Plant Dari Coal Bed Methane (CBM) Dengan Kapasitas Feed 40 MMSCFD. *Teknik ITS*, 2(2), B224–B227, doi:10.12962/j23373539.v2i2.3556
- [7] Nuswantara, M, R, P., Priharnanto, W., & Wibawa, G. (2014). Regasification of LNG (Liquefied Natural Gas). *Jurnal Teknik ITS*, 3(2), 149–152, doi:10.12962/j23373539.v3i2.6438
- [8] Akinola, T. E., Oko, E., & Wang, M. (2019). Study of CO₂ removal in natural gas process using mixture of ionic liquid and MEA through process simulation. *Fuel*, 236, 135–146, doi: 10.1016/j.fuel.2018.08.152
- [9] Rao, V. V., Adi Putra, Z., Bilad, M. R., Wirzal, M. D. H., & Nordin, N. A. H. M. (2020). Optimization of lng cold energy utilization via power generation, refrigeration, and air separation. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 5(3), 321–333, doi: 10.17509/ijost.v5i3.24888
- [10] Al-Breiki, M., & Bicer, Y. (2020). Technical assessment of liquefied natural gas, ammonia and methanol for overseas energy transport based on energy and exergy analyses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 34927–34937, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.181
- [11] Zhao, Z., Zhao, K., Jia, D., Jiang, P., & Shen, R. (2017). Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of supercritical liquefied natural gas in an airfoil fin printed circuit heat exchanger. *Energies*, 10(11), doi: 10.3390/en10111828
- [12] Łaciak, M., Sztékler, K., Szurlej, A., & Włodek, T. (2019). Possibilities of Liquefied Natural Gas (LNG) use for power generation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1), doi: 10.1088/1755-1315/214/1/012138

Pemodelan dan Simulasi Pencairan Gas Alam dengan Persamaan Keadaan Peng Robinson

- [13] Wang, Z., Han, F., Ji, Y., & Li, W. (2020). Case Studies in Thermal Engineering Analysis on feasibility of a novel cryogenic heat exchange network with liquid nitrogen regeneration process for onboard liquefied natural gas reliquefaction. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100760, doi: 10.1016/j.csite.2020.100760
- [14] Sun, H., Zhu, H., Liu, F., & Ding, H. (2014). Simulation and optimization of a novel Rankine power cycle for recovering cold energy from liquefied natural gas using a mixed working fluid. *Energy*, 1–8, doi: 10.1016/j.energy.2014.03.128
- [15] Yoon, S., Oh, J. S., & Kim, J. K. (2020). Dynamic simulation and control of Natural Gas Liquids recovery process. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120349, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120349
- [16] Ismail, M. (2014). Proses Pemurnian Gas Bumi sebagai Bahan baku Kilang Mini (Studi kasus Ladang Marginal Cikarang-Area Operasi Barat EP Pertamina). *M.P.I*, 8(1), 25–38, doi:10.29122/mipi.v8i1.3645
- [17] Zohuri, B. (2018). Chapter 2-Properties of Pure Substances. *Book Chapter of Physics of Cryogenics (An Ultralow Temperature Phenomenon)*, 53–79, doi: 10.1016/b978-0-12-814519-7.00002-1
- [18] Sandler, S.I. (1999). *Chemical and Engineering Thermodynamics*. Singapore: John Wiley and Sons.
- [19] Kyle, B.G. (1999). *Chemical and Process Thermodynamics*. :Prentice- Hall.
- [20] Khairunisa, A., Prabu, U.A., & Suwardi, F.R. (2015). Evaluasi Persiapan dan Pelaksanaan Proyek Komersialisasi Gas Lapangan X untuk memenuhi Syarat Volume dan Tekanan pada Kontrak Perjanjian Jual Beli Gas (PJBG) di Pertamina EP Asset 1 Field Jambi. *Jurnal Ilmu Teknik*, 3(2), 1-6, Retrieved from <http://jit.unsri.ac.id/index.php/jit/article/view/146>
- [21] Smith, J.M., Van Ness, H.C & Abbott, M.M. (2005). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics 7th edition*. New York: McGraw-Hill.
- [22] Wang, M., Zhang, J., & Xu, Q. (2012). Optimal design and operation of a C3MR refrigeration system for natural gas liquefaction. *Computers and Chemical Engineering*, 39, 84–95, doi:10.1016/j.compchemeng.2011.12.003