

## **Optimasi Perancangan Pipa Transmisi Gas untuk Pembangkit PLTGU: Studi Kasus Pipa Transmisi Gas Muara Bekasi - Muara Tawar**

**Zainal Arifin<sup>1</sup>; Donny Mustika<sup>1</sup>; Muhammad Idris<sup>1\*</sup>; Zakie Anugia<sup>1</sup>**

1. PT PLN (Persero), Divisi Enjiniring dan Teknologi, Jakarta

\*Email: [muhammad.idris@pln.co.id](mailto:muhammad.idris@pln.co.id)

### **Abstract**

*Gas transmission pipelines have a crucial role in gas distribution, especially for the supply of power plants. The pipeline design parameter must be technically safe, reliable and cost-effective. This process requires several simulations to obtain optimum results. This study is proposed to examine the 400 MMSCFD of gas transmission pipeline from Muara Bekasi gas station to Muara Tawar combined-cycle power plant by selecting gas pipelines route and diameter according to operational requirements. Gas pipeline route selection has considered geographical, technical, economic, social and environmental aspects. Based on 3 alternative route of pipelines, Option #3 was obtained as the best choice with a length of 7.2 km. The calculation obtained the optimum diameter are Ø24 and 26 inches based on the ratio of the gas flow velocity to the erosional velocity. In addition, the selection of pipe diameter must consider the availability in the market, project time constraints, and gas swing requirements during operation.*

**Keywords:** Optimization, Design, Gas pipeline, Combined-cycle power plant

### **Abstrak**

*Pipa transmisi gas memiliki peran yang sangat krusial dalam penyaluran gas, khususnya untuk kebutuhan suplai pembangkit listrik. Perancangan parameter desain pipa harus mempertimbangkan aspek aman dan andal secara teknis dan layak secara ekonomi. Proses ini membutuhkan beberapa simulasi untuk mendapatkan hasil yang optimum. Kajian ini disusun untuk mengkaji pipa transmisi gas dari stasiun gas Muara Bekasi menuju PLTGU Muara Tawar sebesar 400 MMSCFD dengan melakukan pemilihan jalur pipa gas dan diameter sesuai dengan kebutuhan operasional. Jalur pipa gas dipilih dengan mempertimbangkan aspek geografis, teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dari 3 alternatif jalur pipa, diperoleh Opsi #3 sebagai pilihan terbaik dengan panjang pipa sejauh 7,2 km. Dari hasil perhitungan, diperoleh ukuran diameter optimum Ø24 dan 26 inchi berdasarkan perbandingan kecepatan aliran gas dengan kecepatan erosional. Selain itu, pemilihan diameter pipa juga harus mempertimbangkan ketersediaan di pasar, batasan waktu proyek, dan kebutuhan gas swing pada saat operasi.*

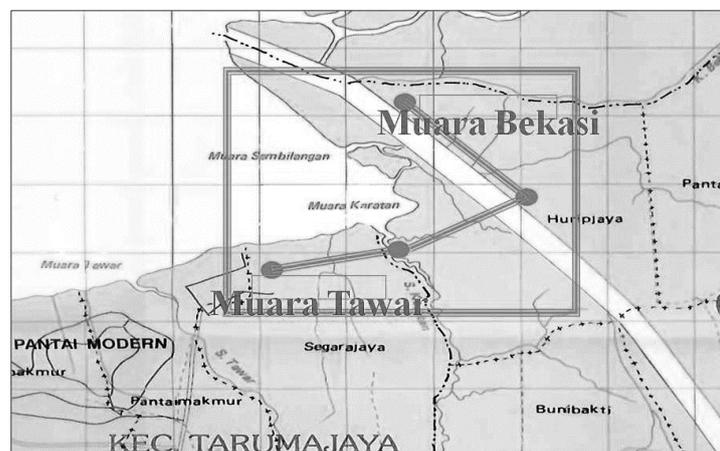
**Kata kunci:** Optimasi, Desain, Pipa gas, PLTGU

## 1. PENDAHULUAN

Jaringan pipa gas memiliki peran yang sangat krusial dalam transportasi gas, khususnya untuk kebutuhan suplai pembangkit listrik. Selain harus optimum secara biaya, perancangan pipa juga harus aman (*safe*) secara operasi. Peran jaringan pipa gas semakin penting dikarenakan bahwa moda transportasi pipa gas ini adalah yang paling murah dan andal [1]. Sehingga, infrastruktur pipa gas menjadi infrastruktur utama dalam mentransportasikan gas alam dari sumber menuju pengguna, selain dengan LNG.

Berdasarkan desain awal, penggunaan bahan bakar di PLTGU Muara Tawar menggunakan bahan bakar minyak (BBM). Seiring dengan usaha peningkatan penyediaan energi listrik, maka mulai dikembangkan penggunaan sumber energi yang lebih murah dan ramah lingkungan dibandingkan dengan BBM, yang selama ini telah banyak digunakan pada sebagian besar pembangkit listrik. Selain itu, kecenderungan kenaikan harga BBM dan mulai menipisnya cadangan minyak bumi yang dimiliki oleh Indonesia semakin mendorong untuk dilakukannya konversi BBM tersebut. Sebagai salah satu alternatif, PLN mencari sumber bahan bakar gas yang andal untuk memenuhi kebutuhan PLTGU Muara Tawar yang berperan sebagai pembangkit esensial dalam sistem kelistrikan Jawa Bali.

Gas yang akan disalurkan ke PLTGU Muara Tawar yaitu sebesar 100-150 MMSCFD, dan untuk selanjutnya akan bertambah seiring bertambahnya pasokan gas dari Sumatera Selatan dan sumber-sumber gas lainnya. Sehubungan dengan kebutuhan bahan bakar gas PLTGU Muara Tawar sebesar 400 MMSCFD untuk mensuplai daya sebesar 1600 MW, maka untuk selanjutnya diperlukan infrastruktur untuk mentransmisikan gas tersebut dari Stasiun Muara Bekasi ke PLTGU Muara Tawar. Untuk keperluan tersebut dirancang pembangunan jaringan infrastruktur pipa gas transmisi yang menghubungkan Stasiun Gas Muara Bekasi ke PLTGU Muara Tawar, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Jalur pembangunan instalasi pipa gas Muara Bekasi-Muara Tawar

Salah satu peran perancangan pipa gas dalam desain injiniring adalah menentukan parameter yang harus dipertimbangkan untuk memastikan bahwa secara teknis dan ekonomi adalah layak [2]. Parameter tersebut diantaranya adalah diameter pipa, tekanan operasi, jumlah kompresor dan panjang jaringan pipa. Perhitungan untuk mendapatkan desain pipa gas yang optimum adalah suatu pekerjaan yang kompleks dan memerlukan perhitungan yang cermat dan mempertimbangkan beberapa faktor [3].

Dalam melakukan perancangan pipa gas, ada beberapa aspek yang harus dipertimbangkan untuk mendapatkan perancangan pipa gas yang optimum, baik optimum secara aspek teknis, investasi ataupun operasional. Dalam aspek teknis, banyak makalah yang membahas terkait dengan pemilihan diameter pipa gas yang optimum. Salah satunya adalah makalah yang dikaji oleh Bhaskaran dan Salzborn [4]. Mereka mengkaji pemodelan linear programming untuk mendapatkan diameter yang optimum pada suatu jaringan pipa gas (*gas pipeline network*). Serupa dengan Bhaskaran dan Salzborn [4], Ivanik et al. [5] mengembangkan sebuah algoritma untuk menentukan diameter pipa gas dan juga kebutuhan jumlah kompresor yang dibutuhkan untuk kasus pipa gas lebih dari 1000 km. Selain terkait dengan optimasi diameter pipa, beberapa peneliti melakukan kajian optimasi terkait operasional pipa gas. Ferber et al. [6] melakukan optimasi operasi pipa gas dengan mempertimbangkan beberapa aspek antara lain biaya operasional kompresor dan meminimumkan penggunaan emisi. Arya et al. [7] mengkaji terkait dengan beberapa teknik optimasi pada pipa gas, khususnya optimasi operasi. Pentingnya optimasi dalam perancangan dan operasi berguna untuk memberikan gambaran kepada enjinir dalam meningkatkan keuntungan (*profitability*) dari investasi ataupun operasional pipa gas dengan mempertimbangkan persyaratan perancangan (*design requirement*) dari instalasi suatu pipa gas.

Makalah ini mengkaji pipa gas transmisi dari stasiun gas Muara Bekasi menuju PLTGU Muara Tawar dengan melakukan pemilihan jalur pipa gas dan diameter sesuai dengan kebutuhan operasional dari pipa tersebut. Kajian ini bertujuan untuk mendapatkan jalur pipa gas dan diameter pipa optimum berdasarkan parameter operasi berupa tekanan operasi dan kecepatan aliran gas.

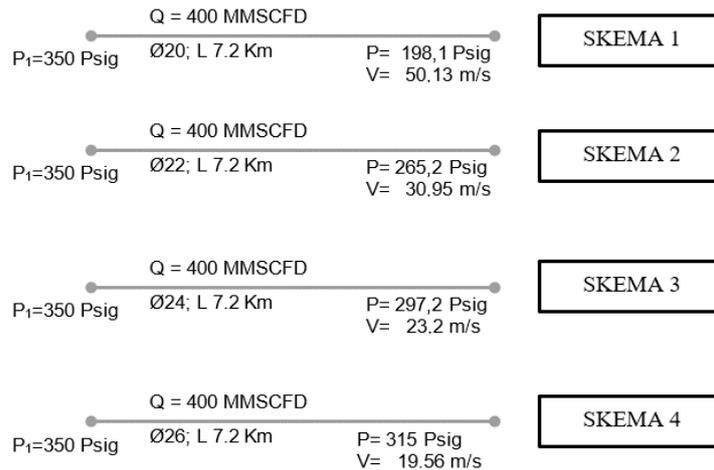
## 2. MATERIAL DAN METODOLOGI

### 2.1. Metode Pelaksanaan

Dalam perancangan pipa gas, ada beberapa langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan sistem pipa gas yang aman secara operasi dan andal secara desain.

1. Menentukan jalur pipa  
Penentuan jalur pipa mempertimbangkan kriteria, seperti; faktor teknis, keekonomian, sosial, dan lingkungan sehingga didapatkan jalur pipa gas yang optimum. Dari penentuan jalur pipa gas ini akan diperoleh berapa panjang desain pipa yang dibutuhkan.
2. Menentukan kebutuhan kapasitas gas untuk PLTGU Muara Tawar  
Verifikasi dan konfirmasi kebutuhan gas untuk bahan bakar dari suatu pembangkit dilakukan untuk memastikan berapa kapasitas gas yang dibutuhkan untuk mengetahui laju aliran pada transmisi pipa gas yang direncanakan.
3. Melakukan perhitungan teknis konsep desain enjiniring untuk transmisi pipa gas  
Setelah data panjang jalur pipa yang dibutuhkan dan kapasitas kebutuhan gas pada transmisi pipa gas diketahui, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan teknis untuk mengetahui nilai parameter, sebagai berikut:
  - a. Tekanan *downstream* (*pressure drop*)
  - b. Kecepatan erosi (*erosional velocity*)
  - c. Kecepatan aliran gas maksimal (*maximum velocity*)
4. Melakukan analisa data dan menentukan diameter pipa gas  
Hasil perhitungan pada butir ke-3 di atas, selanjutnya akan dianalisa untuk menentukan diameter pipa gas yang akan digunakan. Pemilihan diameter pipa dilakukan dengan

membandingkan kecepatan aliran gas maksimum dengan kecepatan erosional. Kecepatan aliran gas maksimum di dalam pipa harus di bawah kecepatan erosional dari gas tersebut. Untuk mendapatkan diameter pipa gas optimum, maka dilakukan perbandingan beberapa alternatif skema diameter yaitu pipa dengan ukuran Ø20, 22, 24, dan 26. Simulasi dilakukan dengan membandingkan parameter-parameter yang ditetapkan, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Kebutuhan gas untuk dapat memenuhi keseluruhan Unit Pembangkit Muara Tawar adalah 400 MMSCFD.



Gambar 2. Variasi diameter pipa untuk penyaluran gas 400 MMSCFD

2.2.Dasar Perhitungan

Berikut ini adalah persamaan-persamaan yang digunakan dalam perhitungan perancangan pipa gas, yang meliputi tekanan *downstream*, kecepatan erosional dan kecepatan aliran gas dalam pipa [8]. Persamaan-persamaan ini akan digunakan untuk penentuan diameter pipa gas. Persamaan (1) adalah formula pendekatan untuk mendapatkan tekanan pipa keluar akibat *pressure drop* sepanjang jalur pipa. Persamaan (4) adalah formula untuk mendapatkan kecepatan erosional dari suatu aliran gas di dalam pipa atau batas kecepatan aliran pipa untuk menghindari proses erosi pada dinding pipa. Sedangkan persamaan (5) adalah formula untuk mendapatkan kecepatan aliran gas pada suatu pipa.

$$P_1^2 - P_2^2 = K_1 \times Q_b^n \tag{1}$$

$$K_1 = R \times L \tag{2}$$

$$R = 2,552 \times 10^{-4} \times T_f \times Z_{avg} \times \frac{G^{0,855}}{D^{4,856}} \tag{3}$$

$$u_e = \frac{100}{\sqrt{\frac{29 \times G \times P}{Z \times R \times T}}} \tag{4}$$

$$u_s = 0,75 \frac{Q_b}{P \times D^2} \tag{5}$$

Keterangan :

$P_1$  = Tekanan masuk (psia)

$P_2$  = Tekanan keluar (psia)

- $K_l$  = Pipeline Resistance
- $L$  = Panjang pipa (*miles*)
- $Q_b$  = Laju aliran gas (*MCF/hour*)
- $T_f$  = Temperatur aliran gas ( $^{\circ}R$ )
- $Z_{avg}$  = Tekanan *compressibility* (1)
- $n$  = *flow exponent* (1,855)
- $G$  = *Gas gravity* (0,65)
- $D$  = Diameter pipa (inchi)
- $R$  = Konstanta gas ( $ft^3$  psi/lbmol R)
- $u_e$  = Kecepatan erosional (ft/s)
- $u_s$  = Kecepatan aliran gas (ft/s)

**3. PEMILIHAN JALUR PIPA GAS**

**3.1. Kriteria Pemilihan Jalur Pipa**

Dalam menentukan jalur pipa yang optimum, maka pada tahap awal dilakukan survei lapangan (*site survey*). Survei ini dilakukan untuk mendapatkan informasi umum mengenai keadaan dan kondisi lahan yang akan dipilih menjadi rute transmisi pipa gas, dan sebagai persiapan untuk penentuan langkah-langkah selanjutnya terkait pelaksanaan survei topografi, penyelidikan tanah (termasuk kondisi geologi tanah permukaan), bagan-bagan air (seperti sungai, laut, danau, rawa, kolam), termasuk jika ada perlintasan (*crossing*) dengan infrastruktur lain, keberadaan jaringan gas eksisting terkait dengan persyaratan jarak antar pipa gas yang diijinkan, serta pengenalan kondisi sosial masyarakat dan lingkungan pada beberapa alternatif pilihan jalur rencana. Ada beberapa aspek yang dipertimbangkan dalam pemilihan jalur pipa, antara lain; aspek geografis, teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan, yang meliputi kriteria seperti tercantum dalam

Tabel 1.

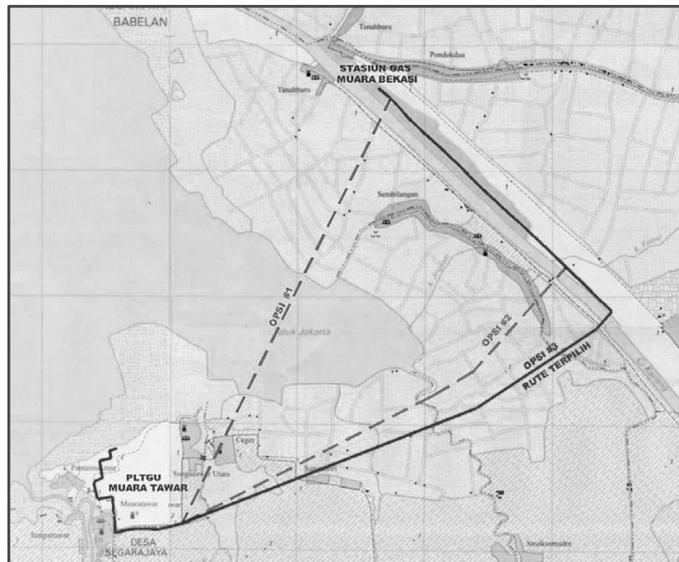
**Tabel 1.** Aspek pertimbangan dalam rencana pemilihan jalur pipa

<b>Aspek Pertimbangan</b>	<b>Deskripsi</b>
Aspek Geografis	Rencana jalur pipa sebaiknya menghindari kondisi daerah medan geografis yang berat dan sulit, daerah-daerah yang mempunyai potensi berbahaya seperti rawan gempa, longsor, liquifaksi, daerah patahan, dan banjir.
Aspek Teknis	Rencana jalur pipa sebaiknya meminimalisir jumlah <i>crossing</i> dengan jalan, sungai, saluran udara tegangan tinggi (SUTT), saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET), pemukiman, dan utilitas umum, yang berpotensi tidak aman dan menimbulkan dampak biaya yang cukup besar, dan juga mempertimbangkan kondisi eksisting agar tidak timbul kerusakan akibat pembangunan jalur pipa yang akan dibangun.
Aspek Ekonomi	Rencana jalur pipa sebaiknya sependek mungkin, sehingga lebih optimum dan efisien dari sisi biaya investasi.

Aspek Sosial dan Lingkungan	Rencana jalur pipa sebaiknya dipilih pada daerah yang secara konstruksi aman, dan tidak berada di daerah yang dilarang (contoh: hutan konservasi, konservasi bakau, situs sejarah/prasejarah, ketidaksiesuaian Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW), konsensi lahan tambang, dan lain-lain), serta tidak menimbulkan konflik, sehingga diharapkan tidak menimbulkan masalah pada tahap konstruksi, instalasi, maupun operasi.
-----------------------------	--

### 3.2. Alternatif Jalur Pipa

Dari beberapa alternatif jalur pipa gas yang ada, dipilih jalur yang paling optimum, dan dengan mempertimbangkan beberapa aspek yang telah dibahas pada bagian 3.1. Pada Gambar 3 menunjukkan beberapa alternatif jalur pipa gas Muara Bekasi-Muara Tawar yang terdiri dari 3 opsi alternatif. Penjabaran setiap opsi dijelaskan pada Tabel 2.



Gambar 3. Alternatif jalur pipa gas Muara Bekasi – Muara Tawar

Tabel 2. Perbandingan beberapa alternatif jalur pipa gas Muara Bekasi-Muara Tawar

Opsi alternatif	Panjang Jalur	Aspek Geografis	Aspek Teknis	Aspek Ekonomi	Aspek Sosial dan Lingkungan
Opsi #1	± 4 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melintasi laut (Teluk Jakarta)</li> <li>Melintasi sungai</li> </ul>	Melintasi area milik TNI AL	Konstruksi pipa gas bawah laut ( <i>offshore</i> )	Melintasi pemukiman penduduk
Opsi #2	± 6 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melintasi jalur darat</li> <li>Melintasi sungai</li> </ul>	-	Konstruksi pipa gas darat ( <i>onshore</i> )	Melintasi pemukiman penduduk

Opsi alternatif	Panjang Jalur	Aspek Geografis	Aspek Teknis	Aspek Ekonomi	Aspek Sosial dan Lingkungan
Opsi #3	± 7 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melintasi jalur darat</li> <li>Melintasi sungai</li> </ul>	-	Konstruksi pipa gas darat ( <i>onshore</i> )	Tidak melintasi pemukiman penduduk

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berdasarkan hasil perbandingan beberapa alternatif jalur pipa gas Muara Bekasi-Muara Tawar, maka diperoleh bahwa Opsi #3 adalah opsi alternatif yang terpilih. Dengan panjang 7,2 km, Jalur pipa gas ini dipilih karena memiliki hasil paling optimum (potensi risiko yang rendah) dari aspek geografis, teknis, sosial dan lingkungan.

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi perhitungan tekanan *downstream* akibat *pressure drop* yang terjadi sepanjang 7,2 km, menggunakan persamaan (1). Perhitungan dilakukan untuk beberapa ukuran pipa Ø20, 22, 24, dan 26. Dari hasil perhitungan terlihat bahwa semakin besar diameter pipa akan mengakibatkan semakin tingginya tekanan *downstream* gas. Hal tersebut disebabkan karena dengan semakin besar diameter pipa, *pressure drop* yang terjadi akan semakin kecil.

**Tabel 3.** Hasil simulasi perhitungan tekanan gas di Muara Tawar

Diameter Pipa (inchi)	Tekanan gas di Muara Bekasi $P_{in}$ (Psig)	Tekanan gas di Muara Tawar $P_{out}$ (Psig)
Ø20	350	198,1
Ø22	350	265,2
Ø24	350	297,2
Ø26	350	315,1

Tabel 4 menunjukkan hasil simulasi perhitungan kecepatan erosional pada pipa gas transmisi pada kondisi maksimum dan minimumnya dengan memvariasikan ukuran pipa Ø20, 22, 24, dan 26, menggunakan persamaan (4). Dari hasil perhitungan tersebut menggambarkan bahwa semakin besar diameter pipa yang digunakan, maka semakin rendah batas kecepatan erosional yang terjadi.

**Tabel 4.** Hasil simulasi perhitungan kecepatan erosional

Diameter Pipa (inchi)	Kecepatan Erosional $u_e$ (ft/s)	Kecepatan Erosional $u_e$ (m/s)
Ø20	127,04	38,11
Ø22	108,70	32,61
Ø24	102,36	30,71
Ø26	99,26	29,78

Ketika gas dalam pipa mengalir melewati pipa dengan kecepatan tinggi, maka dapat terjadi vibrasi, *noise* dan erosi pada pipa, yang akan mengakibatkan penipisan dinding pipa dalam kurun waktu tertentu. Jika kecepatan gas melampaui kecepatan erosional dari desain pipa, maka erosi pada

pipa akan meningkat secara signifikan yang akan berakibat pada penurunan *lifetime* pipa, bahkan dapat menyebabkan kegagalan sistem (*failure*) akibat *overpressure*. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan kecepatan aliran pada pipa gas dalam rentang kecepatan minimum dan maksimum dengan menggunakan persamaan (5). Jika kecepatan gas maksimum pada transmisi pipa gas lebih kecil dari pada kecepatan erosionalnya, maka pipa gas berada dalam kondisi aman dari bahaya erosi.

Tabel 5. Kecepatan aliran pada transmisi pipa gas

Diameter Pipa (inchi)	Kecepatan Minimum Aliran		Kecepatan Maksimum Aliran	
	$u_s$ (ft/s)	$u_s$ (m/s)	$u_s$ (ft/s)	$u_s$ (m/s)
Ø20	98,73	29,62	167,10	50,13
Ø22	81,59	24,48	103	30,95
Ø24	68,56	20,57	77,35	23,20
Ø26	58,42	17,53	65,21	19,56

Dari hasil perbandingan kecepatan erosional dan kecepatan aliran (

Tabel 6) diperoleh bahwa Ø22, 24 dan 26 mempunyai kecepatan aliran operasi di bawah kecepatan erosionalnya, sehingga nominal diameter tersebut dapat dipilih sebagai pipa gas transmisi untuk kebutuhan gas dari Muara Bekasi - Muara Tawar. Rasio kecepatan ( $u_s/u_e$ ) menunjukkan bahwa nilai lebih kecil dari 1 adalah kondisi dimana kecepatan aliran lebih kecil dari kecepatan erosionalnya.

Tabel 6. Perbandingan kecepatan maksimum aliran dengan kecepatan erosional

Diameter Pipa (inchi)	Kecepatan Erosional		Kecepatan Maksimum Aliran		Rasio Kecepatan	Status
	$u_e$ (ft/s)	$u_e$ (m/s)	$u_s$ (ft/s)	$u_s$ (m/s)		
Ø20	127,04	38,11	167,10	50,13	1,32	Tidak memenuhi
Ø22	108,70	32,61	103	30,95	0,95	Memenuhi
Ø24	102,36	30,71	77,35	23,20	0,75	Memenuhi
Ø26	99,26	29,78	65,21	19,56	0,66	Memenuhi

Diamater Ø22 memiliki rasio kecepatan lebih kecil dari 1, namun nilai tersebut masih sangat dekat dengan nilai 1 yang mengakibatkan *safety factor* yang dimiliki juga sangat kecil. Jika nilai kecepatan erosional dilakukan sensitivitas sebesar -5%, maka rasio kecepatan bernilai ~1, yang menunjukkan bahwa pemilihan diameter tersebut tidak aman. Jika nilai kecepatan maksimum dilakukan sensitivitas sebesar +5%, maka rasio kecepatan bernilai ~1, yang menunjukkan bahwa pemilihan diameter tersebut tidak aman. Dari hasil pembahasan di atas diketahui bahwa Ø24 dan 26 mempunyai kecepatan operasi yang aman atau berada di bawah kecepatan erosionalnya. Namun, untuk melakukan pemilihan akhir diameter pipa beserta ketebalan pipa, maka terdapat beberapa faktor yang harus dipertimbangkan, antara lain; ketersediaan di pasar, batasan waktu proyek, dan kebutuhan *gas swing* pada saat operasi.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Pemilihan jalur dan diameter pipa gas Muara Bekasi-Muara Tawar telah dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa aspek. Berdasarkan uraian pada bagian-bagian sebelumnya, pemilihan

alternatif jalur pipa gas yang paling optimum adalah Opsi #3, meskipun memiliki jalur yang lebih panjang dari Opsi #1 dan Opsi #2, sejauh 7,2 km. Namun, jalur ini memiliki potensi risiko yang lebih kecil dari opsi lainnya, seperti tidak melewati laut maupun pemukiman masyarakat. Jalur ini dipilih karena paling optimum dari aspek geografis, teknis, sosial, dan lingkungan, untuk menghubungkan Stasiun Gas Muara Bekasi ke Pembangkit PLTGU Muara Tawar.

Pemilihan diameter pipa gas diperoleh dengan kondisi bahwa nilai kecepatan aliran lebih kecil dari nilai kecepatan erosionalnya, maka pipa dengan ukuran Ø24 dan 26 masih mampu memenuhi kebutuhan kapasitas suplai gas sebesar 400 MMSCFD dalam kondisi aman. Secara keekonomian, desain pipa gas dengan Ø24 lebih ekonomis dari pada pipa gas dengan Ø26, namun masih terdapat faktor-faktor pertimbangan lainnya dalam mengambil keputusan terkait pemilihan tersebut, antara lain; ketersediaan di pasar, batasan waktu implementasi proyek, dan kebutuhan *gas swing* pada saat operasi.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT PLN Persero yang telah memberikan penugasan dan dukungan dalam proyek Transmisi Pipa Gas Muara Bekasi – Muara Tawar sehingga makalah yang penulis lakukan dapat berjalan dengan baik.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mokhatab, S., Mak, J., Valappil, J., and Wood, D., 2014, Handbook of Liquefied Natural Gas.
- [2] Kashani, A. H. A., and Molaei, R., 2014, "Techno-Economical and Environmental Optimization of Natural Gas Network Operation," Chem. Eng. Res. Des., 92(11), pp. 2106–2122.
- [3] Sanaye, S., and Mahmoudimehr, J., 2013, "Optimal Design of a Natural Gas Transmission Network Layout," Chem. Eng. Res. Des., 91(12), pp. 2465–2476.
- [4] Bhaskaran, S., and Salzborn, F. J. M., 1979, "Optimal Diameter Assignment for Gas Pipeline Networks," J. Aust. Math. Soc. Ser. B. Appl. Math., 21(2), pp. 129–144.
- [5] Ivanik, S. A., Eroshkin, S. O., Koshelkov, I. A., and Shalygin, A. V., 2020, "Development of an Algorithm for Determining the Diameter and Number of Compressor Stations of a Gas Pipeline in the C++ Programming Language," J. Phys. Conf. Ser., 1661(1), p. 12173.
- [6] Ferber, P., Basu, U., Venkataramanan, G., Goodreau, M., and Linden, P., 1999, "Gas Pipeline Optimization," PSIG Annu. Meet., p. PSIG-9905.
- [7] Arya, A. K., Jain, R., Yadav, S., Bisht, S., and Gautam, S., 2022, "Recent Trends in Gas Pipeline Optimization," Mater. Today Proc., 57, pp. 1455–1461.
- [8] Murray, A., Mohitpour, M., and Golshan, H., 2003, "Pipeline Design and Construction. A Practical Approach," Am. Soc. Mech. Eng., pp. 57–58.