

MODEL SIMULASI JARINGAN PERPIAAN GAS DENGAN METODE NEWTON-RAPHSON

Joko Waluyo dan Agung Tri Laksana
 Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
 Jl. Grafika No.2, Yogyakarta, 55281
 waluyo.joko@gmail.com

Abstrak

Jaringan perpipaan transmisi gas harus dilengkapi dengan kompresor untuk mencapai tekanan yang diinginkan di tempat tujuan, serta untuk mengatasi adanya rugi tekanan selama transmisinya. Hal yang sangat penting diperlukan pada perancangan jaringan perpipaan ini adalah memprediksi perilaku dinamis aliran fluida untuk optimisasi jaringannya. Penelitian ini ditujukan untuk membuat suatu model simulasi jaringan perpipaan gas, untuk mengoptimisasi lokasi pemasangan kompresor. Secara umum persamaan dasar model disusun terdiri dari elemen pipa dan non pipa. Persamaan dasar elemen pipa disusun berdasarkan aliran *steady* fluida gas, sedangkan untuk elemen non pipanya dibuat dengan regresi polinomial dari diagram unjuk kerja. Penyelesaian simultan persamaan-persamaan di dalam model simulasi menggunakan metode Newton-Raphson. Model simulasi tersebut diimplementasi untuk pra-konstruksi jaringan perpipaan dengan satu sumber dan dua tujuan, sepanjang 265 km dari Semarang ke Gresik. Hasil menunjukkan bahwa model simulasi pada penelitian mampu menyelesaikan permasalahan optimisasi di jaringan perpipaan untuk menentukan lokasi optimal pemasangan kompresor. Dengan menggunakan metode Newton-Raphson, iterasi dapat segera mencapai konvergen dengan memilih harga awal yang mendekati. Selanjutnya model simulasi dapat dikembangkan untuk aplikasi berbagai jaringan perpipaan transmisi gas yang sedang berkembang saat ini.

Keywords : *model simulasi, optimisasi, jaringan perpipaan, Newton-Raphson*

1. Pendahuluan

Pemanfaatan gas untuk kepentingan industry yang semakin meningkat akhir-akhir ini menuntut pengembangan jaringan perpipaan yang lebih kompleks. Peran model simulasi untuk memprediksi perilaku dinamis jaringan perpipaan selanjutnya diarahkan untuk tujuan optimisasi agar mendapatkan kondisi desain yang optimal. Dengan kondisi optimum tersebut diharapkan jaringan pipa mampu bekerja untuk memasok gas sesuai dengan kondisi operasi konsumen baik debit aliran dan tekanannya. Di sisi kompresornya, optimisasi akan menghasilkan lokasi yang tepat untuk pemasangannya serta mampu memilih daya kompresor yang sesuai. Namun demikian prosedur optimisasi jaringan perpipaan ini memerlukan langkah panjang dan kompleks. Dengan demikian perlu dikembangkan lanjut suatu langkah optimisasi yang terarah untuk analisa suatu jaringan perpipaan. Dengan demikian metode simulasi sangat mendukung pengeperasian jaringan perpipaan, yang ditenggarai mempunyai biaya stasiun kompressor mempunyai porsi antara 25% sampai 50% dari total biaya operasional secara keseluruhan [1,2].

Kompleksitas optimisasi jaringan perpipaan ini tergantung pada konfigurasi jaringan perpipaan, yang terdiri elemen pipa dan non-pipa seperti halnya kompresor, regulator, katup, dan lain-lain. Adanya

elemen non-pipa ini membuat simulasi menjadi lebih kompleks, karena persamaan-persamaannya harus dirangkaikan secara terintegrasi untuk mendapatkan hasil optimisasi yang terpadu. Pada penelitian ini dikembangkan suatu model simulasi baru untuk optimisasi jaringan perpipaan yang mengintegrasikan elemen pipa dan elemen non pipa yang berisikan rugi minor maupun kompresor. Kelebihan model simulasi ini dibandingkan dengan software jaringan perpipaan komersil seperti halnya PipeFlow, PipeSIM dan PipeLine adalah kemampuannya menentukan parameter kompresor baik pada rasio kompresi dan daya kompresor sesuai dengan kebutuhannya di jaringan perpipaan. Dari sisi penyelesaian persamaan simultan, model simulasi dengan metode Newton Raphson mampu menyelesaikan iterasi lebih cepat dibandingkan metode *successive substitution* [3].

2. Metodologi

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan suatu model simulasi untuk optimisasi jaringan perpipaan yang digunakan untuk mentransmisikan gas alam dari sumber sesuai dengan kondisi operasi kepada konsumen. Secara umum metodologi penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut :

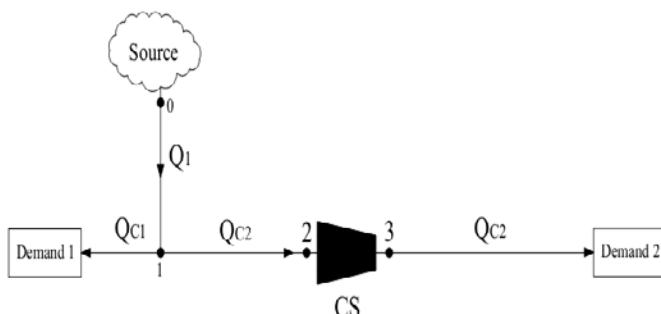
1. Penentuan jenis konfigurasi perpipaan transmisi gas.

2. Penentuan persamaan dasar di dalam model simulasi.
3. Penyelesaian persamaan-persamaan dasar di dalam model simulasi, dengan menggunakan iterasi yang berbasis metode Newton-Raphson, sehingga didapatkan hasil yang konvergen.
4. Optimisasi jaringan perpipaan untuk menentukan letak kompresor.

2.1. Jaringan perpipaan

Model ini mendefinisikan sistem transmisi menjadi jaringan pipa dengan dua elemen dasar: simpul dan cabang. Elemen cabang ini merupakan elemen penghubung simpul [4,5]. Simpul didefinisikan sebagai titik-titik dimana elemen pipa berawal atau berakhir. Simpul ini bisa jadi merupakan titik antara dua atau lebih elemen bergabung, atau dimana ada suplai pengiriman gas. Elemen cabang selanjutnya bisa dibedakan menjadi elemen pipa dan non pipa. Elemen pipa dapat dijabarkan untuk menghitung rugi tekanan akibat rugi mayor dan minor di dalam jaringan perpipaan. Rugi mayor merupakan rugi tekanan karena gesekan, sedangkan rugi minor terjadi karena katup, belokan, pembesaran/pengecilan, saringan, regulator, dll,

Model simulasi untuk penelitian ini adalah perpipaan transmisi gas dari satu sumber mengarah ke dua konsumen yang berbeda tempat dengan satu buah stasiun kompresor. Sumber ditandai sebagai *source*, digunakan untuk mendistribusikan gas ke untuk konsumen *demand 1* dan *demand 2*. Debit dari sumber sebesar Q_1 , sedangkan pasokan ke *demand 1* dan *demand 2*, masing-masing sebesar Q_{C1} dan Q_{C2} . Sebuah kompresor diletakkan untuk memasok gas ke *demand 2*. Gambar 1 memperlihatkan jaringan perpipaan gas yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 1. Jaringan Transmisi Gas

Parameter masukan untuk model simulasi adalah sifat properti gas, panjang pipa, diameter pipa dan tekanan operasi pipa. Parameter keluaran dari simulasi termasuk: tekanan hulu dan hilir kompresor, daya kompresor, debit aliran di setiap simpul. Pembahasan model dengan asumsi gas mematuhi sifat gas ideal dan transfer panas ke lingkungan dari sistem jaringan pipa gas diabaikan.

2.2. Persamaan Dasar Model Simulasi

Persamaan dasar dikembangkan berdasarkan keseimbangan energi, neraca aliran dan persamaan yang diturunkan dari unjuk kerja kompresor. Persamaan aliran dikembangkan untuk menghubungkan laju aliran gas dengan properti gas, diameter dan panjang pipa, tekanan hulu dan hilir [6,7]. Mengacu ke Gambar 1, didapatkan 4 buah persamaan elemen pipa, 1 buah persamaan neraca aliran dan 1 buah persamaan untuk kompresor. Secara simultan persamaan dasar untuk sistem dapat dikembangkan sebagai berikut:

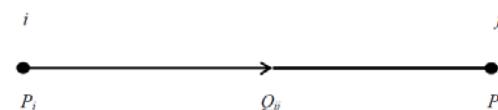
Persamaan di dalam elemen pipa :

$$\begin{aligned} f_1(P_o, P_1, Q_1) &= 0 \\ f_2(P_1, P_{D1}, Q_1) &= 0 \\ f_3(P_1, P_2, Q_{C2}) &= 0 \\ f_4(P_2, P_{D2}, Q_{C2}) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Sedangkan keseimbangan aliran, dirumuskan sebagai berikut:

$$f_5(Q_1, Q_{C1}, Q_{C2}) = 0 \quad (2)$$

Persamaan f_1 , f_2 , f_3 , dan f_4 dikembangkan dari persamaan aliran gas di jaringan perpipaan. Ilustrasi skematis aliran gas di dalam suatu elemen perpipaan disajikan di Gambar 2. Dimana nilai dari K_{ij} ditentukan oleh sifat gas dan karakteristik pipa yang menghubungkan node i dan j .



Gambar 2. Elemen pipa dengan dua simpul

Untuk aliran *steady*, persamaan disusun sebagai aliran isotermal dalam pipa gas yang menghubungkan penurunan tekanan dengan laju aliran. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q = 1.1494 \times 10^{-3} \left(\frac{Tb}{Pb} \right) \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{fGZTL} \right]^{0.5} D^{2.5} \quad (3)$$

Dengan menyederhanakan persamaan (3), maka persamaan umum aliran gas dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_1^2 - P_2^2 = K \frac{Q^2 fL}{D^5} \quad (4)$$

Fungsi f_5 diperoleh dari diagram unjuk kerja kompresor. Parameter utama yang terkait dengan unit kompresor sentrifugal adalah volume laju aliran masuk Q , kecepatan n , head H , dan efisiensi adiabatik η . Hubungan antar parameter ini dapat

dijelaskan dengan dua persamaan berikut [7]:

$$\frac{H}{n^2} = A_H + B_H \left(\frac{Q}{n} \right) + C_H \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + D_H \left(\frac{Q}{n} \right)^3 \quad (5)$$

$$\eta = A_E + B_E \left(\frac{Q}{n} \right) + C_E \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + D_E \left(\frac{Q}{n} \right)^3 \quad (6)$$

Dimana A_H, B_H, C_H, D_H dan A_E, B_E, C_E, D_E adalah konstanta yang tergantung pada unjuk kerja suatu kompresor. Sebagaimana diketahui bahwa variabel utama pada permasalahan jaringan pipa gas adalah tekanan dan laju aliran. Hubungan antara tekanan hulu P_s dan tekanan hilir P_d dengan head H dapat dituliskan sebagai berikut :

$$H = \frac{ZRT_s}{m} \left\{ \left[\frac{P_d}{P_s} \right]^m - 1 \right\} \quad (7)$$

Dimana $m = (k-1) / k$, dengan k adalah rasio panas spesifik. Substitusi nilai H dari persamaan (7) ke persamaan (5) dihasilkan persamaan kompresor yang diperlukan untuk persamaan model simulasi.

$$\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^m = \frac{mn^2}{ZRT_s} \left[A_H + B_H \left(\frac{Q}{n} \right) + C_H \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + D_H \left(\frac{Q}{n} \right)^3 \right] + 1 \quad (8)$$

Dengan demikian persamaan aliran di dalam kompresor dapat dituliskan sebagai berikut :

$$f_6(P_d, P_s, Q_{C2}) = 0 \quad (9)$$

Selanjutnya daya kompresor dapat dihitung dari persamaan berikut

$$HP = 4.0639 \left(\frac{k}{k-1} \right) QT_s \left(\frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) \left(\frac{1}{\eta_a} \right) \left[\left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \quad (10)$$

2.3. Metode Newton-Raphson

Setelah persamaan dasar dikembangkan, langkah berikutnya adalah penyelesaian model simulasidengan menggunakan metode Newton-Raphson. Kelebihan metode Newton-Raphson adalah dapat mencapai nilai konvergen dengan iterasi yang relatif cepat, dengan pemilihan harga awal yang mendekati. Penulisan ke 6 persamaan tersebut ke dalam bentuk matriks dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(P_1, P_2, \dots, P_{NP}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{NQ}) = 0 \\ F_2(P_1, P_2, \dots, P_{NP}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{NQ}) = 0 \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ F_{NTotal}(P_1, P_2, \dots, P_{NP}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{NQ}) = 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

Prosedur iterasi multivariabel Newton-Raphson adalah :

$$X_{new} = X_{old} - [A|_{Xold}]^{-1} F(X_{old}) \quad (12)$$

Dimana A disebut matriks Jacobian yang unsur-unsurnya adalah turunan parsial dari fungsi terhadap variabel.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial P_{NP}} & \frac{\partial F_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial Q_{NQ}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial P_{NP}} & \frac{\partial F_2}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial Q_{NQ}} \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial F_{NTotal}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial F_{NTotal}}{\partial P_{NP}} & \frac{\partial F_{NTotal}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial F_{NTotal}}{\partial Q_{NQ}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Nilai dari variabel tidak diketahui dihitung dari persamaan (11) secara iteratif sampai persentase kesalahan maksimum relatif mencapai nilai yang diinginkan.

3. Hasil dan Pembahasan

Model simulasi ini diimplementasikan untuk menganalisa jaringan pra-konstruksi jalur perpipaan Semarang-Gresik PT. Pertamia GAS. Jaringan perpipaan gas tersebut terdiri atas satu *source* yaitu dari FSRU (*Floating Storage Regasification Unit*) dan dua tujuan yaitu PLTGU Tambak Lorok (*demand 1*) dan PLTGU Gresik (*demand 2*), titik percabangan jaringan pipa dari sumber ke masing-masing tujuan adalah ORF (*Onshore Receiving Facility*). Data-data jaringan perpipaan tersebut tersaji di Tabel 1 sampai dengan 3.

Tabel 1. Ukuran Pipa

Ruas Pipa	Panjang (km)	Diameter (inch)
0-1	21.2	20
1-Q _{C1}	0.8	24
1-Q _{C2}	265	24

Tabel 2. Input tekanan dan debit

Simpul	Tekanan (kPa)	Debit (m ³ /jam)
Source (0)	4550	440.000
Demand 1 (Q _{C1})	2500	320.000
Demand 2 (Q _{C2})	2500	80.000

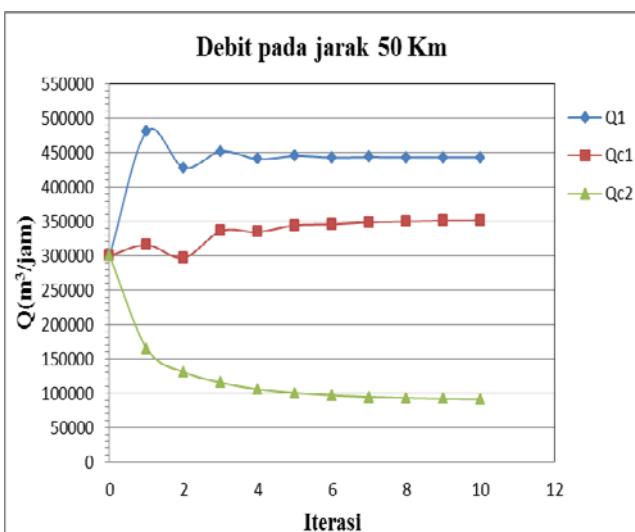
Tabel 3. Sifat gas

Variabel	Nilai
Specific Gravity Gas (G)	0.5
Temperatur Gas (T)	308 K
Tekanan Dasar (P_n)	0.1 MPa
Temperatur Dasar (T_n)	288 K
Konstanta Gas (R_{air})	287.5 J/Kg.K
Kompresibilitas Gas (Z)	0.91
Eksponen Isentropik (k)	1.287
Rasio Kompresi Kompresor	1.4
Kecepatan kompresor (rpm)	8000

Nilai variabel-variabel pada tabel propertis di atas adalah tetap untuk semua persamaan, sehingga besarnya nilai K pada persamaan (4) dapat dicari dengan mensubstitusikan nilai-nilai itu ke persamaan (3), sehingga diperoleh nilai K sebagai berikut,

$$K = 1.33 \times 10^{10} \frac{fL}{D^5} \quad (14)$$

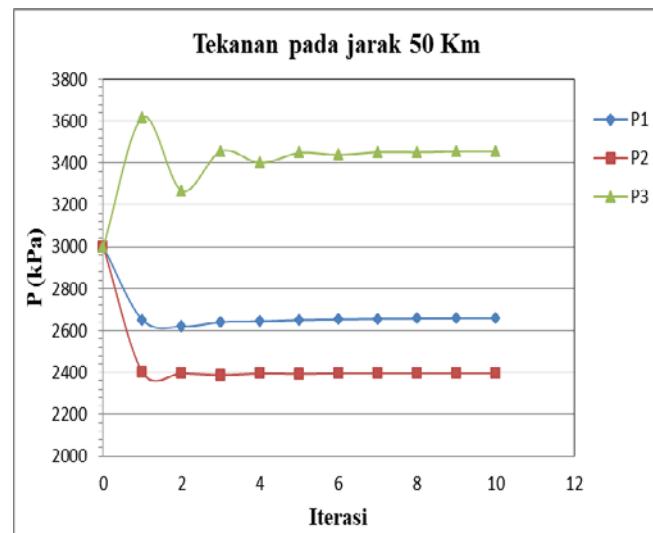
Di dalam persamaan kompresor, harga koefisien A_H , B_H , C_H dan D_H diperoleh dengan regresi linear polynomial derajat 3 terhadap diagram unjuk kerja kompresor. Pada proses iterasi, harga awal dilakukan dengan memasukkan angka sembarang untuk masing-masing variabel. Iterasi dilakukan dengan memasukkan harga awal sampai diperoleh hasil yang konvergen. Untuk tujuan optimisasi letak kompresor, dilakukan dengan implementasi model simulasi dengan memvariasikan letak kompresor setiap 50 Km jaringan perpipaan dari simpul 1 ke simpul *demand 1*. Dengan demikian diperoleh simulasi jaringan perpipaan dengan jarak 50 km, 100 km, 150 km, 200 km dan 250 km.



Gambar 3. Konvergensi debit dalam model simulasi pada jarak 50 km

Hasil perhitungan konvergen untuk debit aliran dan tekanan pada simulasi jarak 50 km, disajikan di Gambar 3 dan 4. Dari Gambar 3 dan 4 tersebut, diperoleh hasil hasil yang konvergen kurang dari 10 iterasi,

Dari gambar 4, terlihat bahwa iterasi mencapai konvergen pada sekitar 5 kali iterasi. Untuk mencapai konvergen, harga P_1 dan P_3 diperoleh setelah terlebih dahulu fluktuasi sedangkan untuk P_2 dapat segera mencapai konvergen.



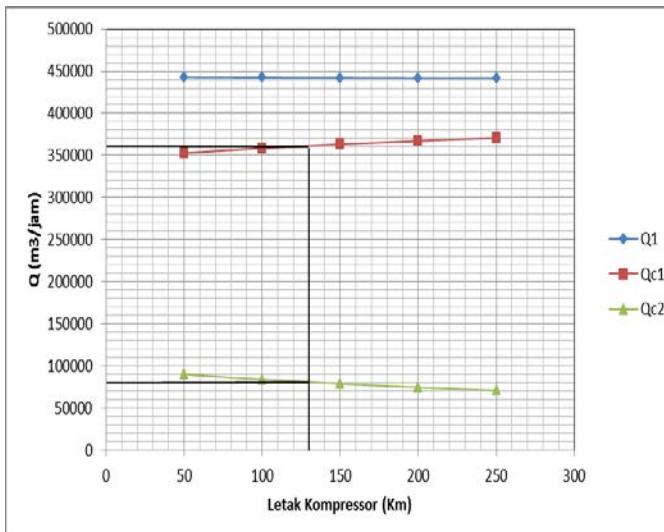
Gambar 4. Konvergensi tekanan dalam model simulasi pada jarak 50 km

Tabel 4. Harga tekanan pada tiap-tiap simpul pada simulasi setiap interval 50 km

Letak Kompressor (km)	Tekanan (kPa)					
	P_0	P_1	P_2	P_3	P_{D1}	P_{D2}
50	4550	2659	2396	3459	2500	2500
100	4550	2664	2189	3171	2500	2500
150	4550	2669	2018	2931	2500	2500
200	4550	2672	1872	2726	2500	2500
250	4550	2675	1747	2549	2500	2500

Tabel 5. Harga debit aliran tiap-tiap simpul pada simulasi setiap interval 50 km

Letak Kompressor (km)	Debit (m³/jam)		
	Q_1	Q_{C1}	Q_{C2}
50	442900	352800	90030
100	442400	358600	83850
150	442100	363300	78750
200	441700	367300	74450
250	441500	370700	70770



Gambar 5. Hasil simulasi dengan variasi letak kompresor per 50 km

Pada situasi operasi di lapangan, kebutuhan gas untuk PLTGU Tambak Lorok adalah $360.000 \text{ m}^3/\text{jam}$ dan untuk PLTGU Gresik adalah sebesar $80.000 \text{ m}^3/\text{jam}$. Untuk mendapatkan letak kompresor yang optimal, dapat dilakukan dengan menarik garis lurus dari sumbu ordinat (debit) pada harga $360.000 \text{ m}^3/\text{jam}$ ke kanan sampai menyentuh kurva Q_{c2} dan selanjutnya menarik garis vertikal ke sumbu absis. Garis vertikal ini memotong kurva Q_{c1} di sekitar harga $80.000 \text{ m}^3/\text{jam}$. Letak kompresor yang optimal pada jaringan perpipaan ini diperoleh dari perpotongan garis vertikal di sumbu absis yang menunjukkan jarak (km). Dari gambar 5, dapat dilihat bahwa letak kompresor yang optimal adalah pada jarak 130 km dari ORF. Dari perolehan perhitungan debit aliran, tekanan isap dan tekan, selanjutnya daya kompresor dari persamaan (10) sebesar 26,658 kW.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dikembangkan suatu model simulasi yang bisa digunakan untuk optimisasi jaringan perpipaan gas. Model simulasi tersebut mampu mengakomodasikan rugi mayor dan minor perpipaan serta parameter di dalam kompresor. Dengan penyelesaian metode Newton Raphson, memungkinkan model ini menyelesaikan iterasi dengan relatif cepat. Hasil simulasi pada jaringan perpipaan gas jalur Semarang ke Gresik, menunjukkan bahwa model ini dapat digunakan untuk melakukan optimisasi perletakan kompresor yang optimal. Model simulasi jaringan perpipaan ini selanjutnya dapat diaplikasikan untuk optimisasi jaringan perpipaan lainnya untuk memperoleh kondisi optimal pengoperasianya.

Nomenklatur

A_H, B_H, C_H, D_H	Koefisien regresi polinomial kompresor
CS	Stasiun kompresor

D	Diameter pipa (mm)
f	koefisien gesekan pipa
g	Konstanta gravitasi (ms^{-2})
G	Berat jenis gas
H	Head adiabatik
k	Rasio Panas spesifik
K_{ij}	Hambatan aliran pipa
L	Panjang (Km)
n	Kecepatan kompresor (rpm)
P	Tekanan (kPa)
P_0	Tekanan pada sisi masuk
P_1	Tekanan di ORF
P_2	Tekanan di sisi masuk kompresor
P_3	Tekanan di sisi keluar kompresor
P_d	Tekanan hilir
P_s	Tekanan hulu
P_n	Tekanan standard, 0.1 MPa
Q	Debit (m^3/jam)
Q_1	Debit di sumber
Q_{C1}	Debit di <i>demand</i> 1
Q_{C2}	Debit di <i>demand</i> 1
T	Temperatur gas
T_n	Temperatur standar, 288 K
Z	Koefisien kompresibilitas gas

Referensi

- [1]. Ibrahim, A.S.b, Lien, T.T, Santoso, I.B, Laothumthut, P, Natural Gas Pipeline Development in South East Asia, Asia Pacific Energi Research Center, Tokyo, 2000.
- [2]. Ríoz-Mercado, R.Z., Kim, S, Boyd, E.A., Efficient Operation of Natural Gas Transmission Sistem : A Network-Based Heuristic for Cyclic Structures, PROS Revenue Management, Houston, 2003.
- [3]. Joko Waluyo dan Nurrohmat Widjajanti, Model Simulasi Jaringan Perpipaan Transmisi Gas dengan Metode Successive Substitution, Prosiding Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Perkembangan Teknologi ke 18, PSIT-UGM, 2012
- [4]. Woldeyohannes A. D, and Majid, M. A. A,, Simulation Model for Natural Gas Transmission Pipeline Network Sistem, Simulation Modeling Practice and Theory (SIMPAT), 2010.
- [5]. Nimmanonda. P, Uraikul. V, Chan, C.W, Tontiwachwuthikul, P, A Computer Aided Model for Design of a Simulation System for the Natural Gas Pipeline Network System Proceeding of the 2001 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 0-7803-7514/02.
- [6]. Menon E.S, Gas Pipeline Hydraulics, Taylor and Francis Group, New York, 2005.
- [7]. Wu S., Steady State Simulation and Fuel Cost Minimization of Gas Pipeline Network, PhD Dissertation, University of Houston, 1998.