

Pengembangan Model Jaringan Pipa Salur Gas dengan Menggunakan Algoritma Sederhana

Oleh:

Edward ML Tobing

SARI

Jaringan pipa salur adalah alat transportasi gas alam yang mempunyai faktor keamanan yang cukup baik serta ekonomis. Jaringan pipa salur ini akan sesuai dengan kapasitasnya, bila didesain dengan optimal. Untuk mendesain atau mengevaluasi jaringan pipa salur gas yang optimal, dapat dilakukan dengan menggunakan model simulasi jaringan pipa salur gas. Model simulasi jaringan pipa gas dalam tulisan ini telah dikembangkan dengan menganggap aliran dalam pipa adalah *steady state*. Analisis terhadap aliran *steady state* dilakukan untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada setiap node dan laju alir pada setiap (elemen penghubung *node*) *leg*, di mana sekurang-kurangnya satu harga tekanan node serta *supply* atau *demand* pada *node* lainnya diketahui.

Dalam makalah ini, metode yang digunakan untuk menganalisis aliran *steady state* pada jaringan pipa gas adalah algoritma sederhana dengan ciri *step-forward* yang dikembangkan oleh Tian-Adewuni. Dalam metoda ini, harga tekanan *node* langsung dikoreksi dari setiap iterasinya berdasarkan ketidakseimbangan laju alir massa pada *node* tersebut, karena perkiraan harga tekanan yang digunakan untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa pada tahap iterasi sebelumnya belum tepat. Dengan menggunakan algoritma ini, maka dapat mengembangkan model simulasi jaringan pipa gas tanpa menggunakan matriks aljabar, dan dapat memecahkan masalah jaringan pipa gas dengan model jaringan Nodal.

Kata kunci : model jaringan pipa gas, algoritma sederhana.

ABSTRACT

Pipeline Network is a tool of natural gas transportation that is considered economical and safe. This network will be in an optimum capacities when perfectly designed. The pipeline network simulation gas model can be used for designing or optimally evaluating gas pipeline network. The model was developed by assuming a steady state flow in pipeline. A steady state flow is analyzed to determine gas flow pressure distribution in each node and gas rate in each leg, at least one node pressure and supply or demand at other node is known.

This paper uses a simple algorithm featuring step-forward that was developed by Tian-Adewuni to analyze steady state flow at network of gas pipeline. In this method, the value of node pressure is directly corrected from each iteration based on mass flowrate imbalance of node, because the estimate pressure that was used to determine gas mass flowrate in pipeline of the previous iteration phase has not been precise yet. By using this simple algorithm, the gas pipeline network simulation model can be developed without using algebra matrix and the problem of gas pipeline network using Nodal model can be solved.

Keyword : model of gas pipeline network, simple algorithm.

I. PENDAHULUAN

Gas alam yang terkumpul dari sumur-sumur produksi dapat didistribusikan ke pelanggan melalui suatu jaringan pipa, dan dengan semakin meningkatnya penggunaan gas alam sebagai bahan bakar industri maupun rumah tangga serta sebagai bahan baku industri petrokimia, maka jaringan pipa gas akan semakin luas dan kompleks. Jaringan pipa tersebut merupakan sistem transportasi yang dapat diandalkan, aman dan ekonomis. Dengan demikian jika terjadi kerusakan pada sistem tersebut akan menyebabkan hilangnya sebagian fluida gas atau berkurangnya kapasitas aliran. Untuk dapat menghindari hal tersebut, maka perlu mendesain jaringan pipa yang sesuai dengan kapasitasnya, sehingga akan didapat tekanan operasi, laju alir dan ukuran diameter pipa yang optimal, dan kemudian dapat menjamin pasokan gas ke konsumen. Pengembangan desain jaringan pipa gas yang optimal berdasarkan suatu kriteria tertentu dan pelaksanaannya cukup ekonomis serta rasionil, hanya mungkin dilakukan dengan menggunakan model simulasi jaringan pipa gas. Tujuan pengembangan model simulasi ini adalah untuk dapat memperkirakan kinerja jaringan pipa di bawah kondisi operasi yang berbeda-beda. Perkiraan ini dapat digunakan sebagai panduan dalam mendesain dan pengoperasian sistem jaringan pipa yang sebenarnya.

Karakteristik aliran fluida gas di dalam pipa terdiri dari aliran *steady state* dan aliran *unsteady state* atau *transient*. Walaupun pada kenyataannya aliran *steady state* di dalam pipa jarang terjadi, akan tetapi simulasi jaringan pipa pada kondisi aliran *steady state* berguna bagi perencanaan jangka panjang suatu sistem transportasi gas yang baru maupun pengembangan atau modifikasi suatu sistem transportasi gas yang telah terpasang. Tujuan analisis *steady state* jaringan pipa gas adalah untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada tiap *node* dan laju alir gas setiap elemen penghubung *node* (*leg*). Analisis ini harus memenuhi Hukum Kontinuitas aliran pada setiap *node* (Hukum Kirchoff – I) dan Hukum kekekalan energi pada rangkaian tertutup (Hukum Kirchoff – II).

Analisis *steady state* jaringan gas dapat dilakukan dengan 3(tiga) metode yaitu analisis *Nodal*, *Loop* dan *Loop-Node*. Pada umumnya metode yang digunakan dalam analisis *steady state* jaringan pipa gas, baik yang menggunakan metode analisis *Nodal*, *Loop*

maupun *Loop-Node* dengan cara merepresentasikan sistem jaringan pipa menggunakan sekumpulan persamaan aljabar *non linier* yang dikemas dalam bentuk matriks aljabar dan kemudian diselesaikan dengan cara implisit maupun eksplisit. Dengan demikian harus melakukan berbagai teknik manipulasi untuk memperoleh waktu eksekusi yang minimal.

Aliran fluida *compressible* melalui pipa telah dipelajari oleh para peneliti, dan persamaan yang paling umum digunakan adalah persamaan *Weymouth* dan *Panhandle*. Pada dasarnya kedua persamaan tersebut dikembangkan untuk aliran gas horizontal dan pipa yang agak miring. Untuk pipa yang agak miring, perhitungan perbedaan tekanan dapat dihitung hanya dengan menambahkan perubahan ketinggian statik dari kolom gas tersebut. Hal ini memadai bila perubahan elevasi cukup kecil seperti yang terdapat pada pipa gas, namun tidak memadai untuk perhitungan di dalam sumur gas di mana pipa mempunyai arah yang tegak atau hampir tegak. Karena pada kasus ini, gaya gravitasi mempunyai peranan penting yang mempengaruhi kecepatan fluida serta pengaruh gesekan.

Dalam tulisan ini, pengembangan model jaringan pipa gas menggunakan persamaan analitik dari Tian-Adewumi¹⁾ yang diperoleh dari persamaan dasar diferensial yang dapat menggambarkan aliran fluida *compressible* tanpa mengabaikan bentuk energi kinetik. Proses penurunannya tetap menggunakan anggapan suhu dan faktor kompresibilitas konstan. Sehingga persamaan ini cocok untuk digunakan dalam perhitungan pada pipa salur dan sumur gas. Desain dan analisis dari jaringan pipa yang kompleks sering harus mengikuti algoritma perhitungan yang rumit. Tian-Adewumi²⁾ telah menyederhanakan algoritma tersebut dengan menggunakan persamaan analitik yang sebelumnya telah dikembangkan. Metode ini termasuk dalam analisis *steady state* jaringan pipa gas dengan algoritma *step-forward* yang memberikan alternatif baru untuk model simulasi jaringan pipa gas tanpa menggunakan matriks aljabar dan tergolong dalam analisis *Nodal* yang sederhana. Prinsip dasar yang digunakan adalah mengoreksi harga tekanan pada setiap *node* atau menghitung pasokan dan permintaan berdasarkan ketidakseimbangan laju alir massa gas yang terjadi pada setiap tahap iterasi sampai memenuhi kedua hukum aliran gas dalam jaringan pipa. Persamaan tersebut dapat diaplikasikan secara luas dan digunakan untuk rangkaian pipa pada berbagai pola aliran.

II. PENURUNAN PERSAMAAN

Persamaan umum aliran *steady state* gas dalam pipa diturunkan dari persamaan kesetimbangan energi dan persamaan kesetimbangan massa (persamaan kontinuitas).

- Persamaan Kesetimbangan Energi:

$$\frac{dP}{dx} + \frac{\rho v}{g_c} \frac{dv}{dx} + \frac{g}{g_c} \rho \sin \alpha + \rho \frac{dh_f}{dx} = 0 \quad (1)$$

- Persamaan Kontinuitas:

$$\frac{d(\rho v)}{dx} = 0 \quad (2)$$

dengan dh_f menyatakan *head loss* akibat friksi atau gesekan sepanjang pipa dan didefinisikan sebagai:

$$dh_f = \frac{fv^2}{2g_c D} dx \quad (3)$$

Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa hasil kali antara densitas dengan kecepatan aliran gas (ρv) adalah konstan sepanjang pipa. Untuk luas penampang pipa (A) yang konstan, maka:

$$\rho v = \rho_{sc} v_{sc} = \frac{W}{A} \quad (4)$$

dimana W adalah laju alir massa gas, A adalah luas penampang bagian dalam pipa, dan subskrip "sc" menyatakan kondisi standar. Berdasarkan definisi,

$$\rho = \frac{PM_g}{ZRT} \quad (5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (5), (4), dan (3) ke persamaan (1) diperoleh:

$$\frac{dP}{dx} + \frac{W}{Ag_c} \frac{dv}{dx} + \frac{gM_g P}{g_c ZRT} \sin \alpha + \frac{fWv}{2DAg_c} = 0 \quad (6)$$

Dari persamaan (4) dan (5), hubungan antara v dan P adalah:

$$v = \frac{WZRT}{AM_g P} \quad (7)$$

$$\frac{dv}{dx} = - \frac{WZRT}{AM_g P^2} \frac{dP}{dx} \quad (8)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (7) dan (8) ke persamaan (6) akan didapatkan bentuk:

$$\frac{dP}{dx} - C_1 \frac{W^2 ZRT}{g_c A^2 M_g^2 P^2} \frac{dP}{dx} + C_2 \frac{gM_g P}{g_c ZRT} \sin \alpha + C_3 \frac{fW^2 ZRT}{2DA^2 g_c P M_g} = 0 \quad (9)$$

Pada persamaan (9) di atas, satuan P adalah *psia*, D dalam *inch*, A dalam *in²*, W dalam *lb/detik*, T dalam $^{\circ}R$, g merupakan percepatan gravitasi (*feet/detik²*) dan M_g dalam *lb_m/mol*. Harga konstanta C_1 , C_2 , C_3 , berturut-turut adalah 144, 1/144, dan 1728 untuk harga "x" dalam satuan *feet*. Bentuk integrasi persamaan (9) adalah:

$$\int \left(\frac{1 - C_1 \frac{W^2 ZRT}{A^2 g_c M_g^2 P^2}}{-C_2 \frac{gM_g P}{g_c ZRT} \sin \alpha - C_3 \frac{fW^2 ZRT}{2DA^2 g_c P M_g}} \right) dp = \int_0^L dx \quad (10)$$

atau:

$$\left(\frac{g_c ZRT}{C_3 M_g \sin \alpha} + \frac{C_1 D}{C_3 f} \right) \ln \left[\frac{C_3 f W^2 + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1^2}{C_3 f W^2 + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_2^2} \right] - \frac{C_1 D}{C_3 f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = L \quad (11)$$

Dengan mendefinisikan:

$$y = \frac{\frac{2C_1 D}{C_3 f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) + L}{\frac{C_1 D}{C_3 f} + \frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g g \sin \alpha}} \quad (12)$$

maka akan didapatkan bentuk berikut :

$$\left[\frac{C_3 f W^2 + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1^2}{2C_2 D A^2} \right] = e^y \quad (13)$$

sehingga,

$$W = \sqrt{\frac{2C_2 D A^2 M_g^2 g \sin \alpha (P_2^2 e^y - P_1^2)}{C_3 f Z^2 R^2 T^2 (1 - e^y)}} \quad (14)$$

dimana :

P_1 = Tekanan *inlet* pipa,

P_2 = Tekanan *outlet* pipa.

Persamaan (14) dapat digunakan untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa dengan berbagai macam konfigurasi kecuali pipa horizontal ($\alpha = 0$). Konversi tanda untuk sudut α pada berbagai konfigurasi diberikan pada Gambar 1. Untuk menentukan laju alir dalam pipa horizontal diturunkan dari persamaan (9).

Dengan menentukan $\alpha = 0$, sehingga persamaan (9) menjadi:

$$\int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{1 - \frac{C_1 W^2 ZRT}{A^2 g_c M_g P^2}}{\frac{C_3 f W^2 ZRT}{2DA^2 g_c P M_g}} \right) dp = \int_0^L dx \quad (15)$$

Hasil integrasi persamaan (15) adalah:

$$\frac{DA^2 g_c M_g}{C_3 f W^2 ZRT} (P_1^2 - P_2^2) - \frac{2C_1 D}{C_3} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = L \quad (16)$$

atau:

$$W = \frac{DA^2 g_c M_g (P_1^2 - P_2^2)}{C_3 f ZRT \left(\frac{2C_1 D}{C_3 f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) + L \right)} \quad (17)$$

Laju alir volume gas pada kondisi standar (MMSCFD) ditentukan dengan persamaan:

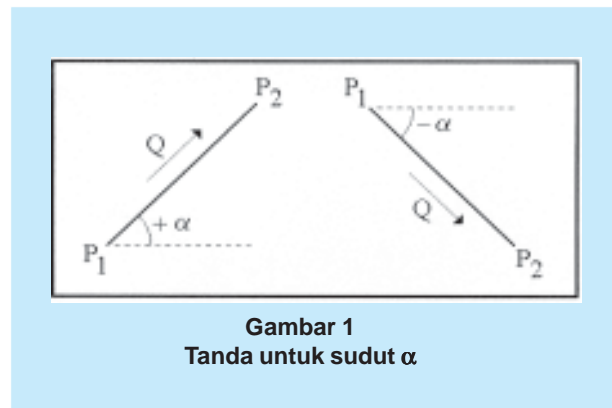
$$Q_{sc} = C_4 \frac{W}{\rho_{sc}} = C_4 \frac{WRT_{sc}}{M_g P_{sc}} \quad (18)$$

dimana:

$$C_4 = 0.0864 ; P_{sc} = 14.7 \text{ psia} ; T_{sc} = 60 \text{ }^\circ\text{F} (520 \text{ }^\circ\text{R})$$

A. Penentuan Faktor Gesekan

Faktor gesekan (f) yang diperlukan untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa dengan persamaan (14) atau persamaan (17), merupakan fungsi dari kekasaran relatif pipa (e/D) dan bilangan Reynold – yang merupakan fungsi laju alir gas yang akan dihitung. Oleh karena itu diperlukan prosedur iterasi untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa tersebut. Sebagai perkiraan awal harga faktor gesekan dalam iterasi dapat digunakan $f = 0.015$ atau $f = 0.02$. Kemudian laju alir gas dihitung dengan persamaan aliran gas. Dari harga laju alir yang



Gambar 1
Tanda untuk sudut α

diperoleh ditentukan besarnya faktor gesekan. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk menentukan faktor gesekan. Salah satunya adalah korelasi Chen N. H, yaitu:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{(e/D)}{3.7056} - \frac{5.0452}{N_{Re}} \log \left[\frac{(e/D)^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{N_{Re}^{0.8981}} \right] \right] \quad (19)$$

dimana:

$$N_{Re} = \frac{20011 \gamma_g Q_{sc}}{D \mu_g} \quad (20)$$

Harga “f” yang dihitung lalu dibandingkan dengan harga ”f” sebelumnya sampai tercapai konvergensi. Penentuan faktor gesekan dengan persamaan menganggap bahwa efisiensi pipa sama dengan 100 fa %, maka harga faktor gesekan yang sesungguhnya, harus dikoreksi dengan persamaan:

$$\frac{1}{\sqrt{f_a}} = \eta_{pipa} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (21)$$

B. Penentuan Sifat Fisik Gas

Dalam melakukan integrasi persamaan (10) dan (15), suhu aliran dan faktor kompresibilitas gas dianggap konstan sepanjang pipa. Sebagai pendekatan dalam perhitungan sifat-sifat fisik gas yang mengalir yang merupakan fungsi tekanan dan suhu, dapat digunakan harga rata-rata tekanan dan suhu inlet dan outlet pipa.

1. Penentuan Viskositas Gas

Viskositas gas yang digunakan untuk menghitung bilangan Reynold ditentukan berdasarkan korelasi Lee-Gonzales dan Eakin, yaitu:

$$\mu_g = 10^{-4} K \exp \left[X \left(\frac{\rho_g}{62.4} \right)^Y \right] \quad (22)$$

$$X = 3.5 + \frac{986}{T} + 0.01M_g \quad (22.b)$$

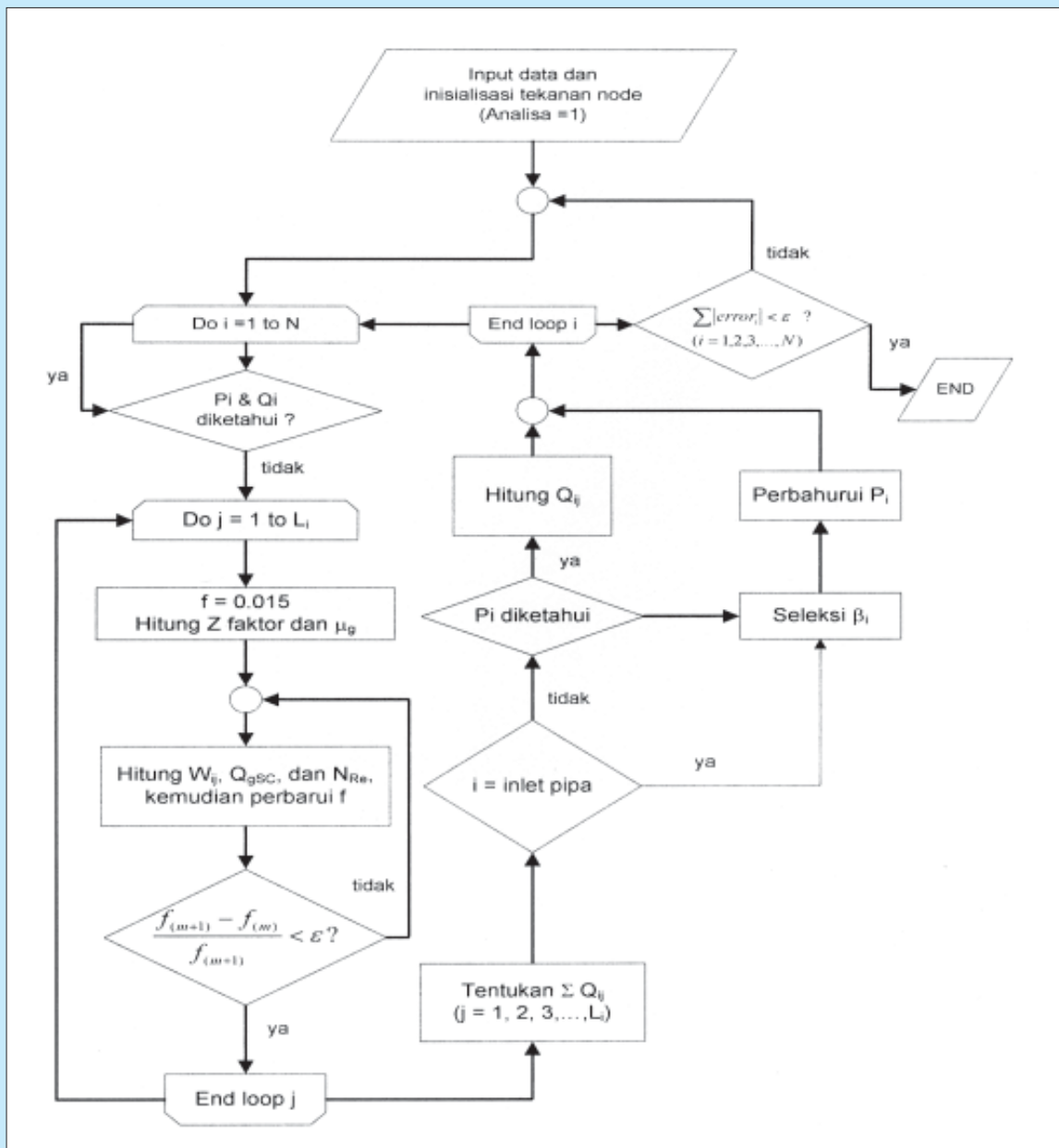
$$Y = 2.4 - 0.2X \quad (22.c)$$

dengan:

$$K = \frac{(9.4 + 0.02M_g) \bar{T}^{-1.5}}{209 + 19M_g + \bar{T}} \quad (22.a)$$

2. Penentuan Faktor Kompresibilitas Gas

Faktor kompresibilitas merupakan fungsi P_r dan T_r , dalam hal ini adalah:



Gambar 2
Diagram alir model jaringan pipa gas

$$P_r = \frac{\bar{P}}{P_c} = \frac{P_1 + P_2}{2P_c} \quad (23.a)$$

$$T_r = \frac{\bar{T}}{T_c} = \frac{T_1 + T_2}{2T_c} \quad (23.b)$$

Untuk menentukan harga tekanan dan suhu kritis (P_c dan T_c) digunakan korelasi Standing, yaitu:

$$P_c = 677.0 + 15.0\gamma_g - 37.5\gamma_g^2 \quad (24.a)$$

$$T_c = 168.0 + 325.0\gamma_g - 12.5\gamma_g^2 \quad (24.b)$$

di mana :

$$\gamma_g = \frac{M_g}{28.96} \quad (25)$$

Sedangkan harga faktor kompresibilitas ditentukan dengan korelasi Dranchuk-Abu Kassem, yaitu:

$$Z = \left[A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^3} + \frac{A_4}{T_r^4} + \frac{A_5}{T_r^5} \right] \rho_r + \left[A_6 + \frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right] \rho_r^2 - A_9 \left[\frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^2} \right] \rho_r^2 +$$

$$A_{10} \left(1 + A_{11} \rho_r^2 \right) \frac{\rho_r^2}{T_r^3} \text{EXP} \left(-A_{11} \rho_r^2 \right) + 1 \quad (26)$$

dengan:

$$\rho_r = \frac{0.27 P_r}{Z T_r} \quad (26.a)$$

di mana:

$A_1 = 0.32650$	$A_2 = -1.0700$	$A_3 = -0.5339$
$A_4 = 0.01569$	$A_5 = -0.05165$	$A_6 = 0.5475$
$A_7 = -0.7361$	$A_8 = 0.18440$	$A_9 = 0.10560$
$A_{10} = 0.6134$	$A_{11} = 0.7210$	

Prosedur iterasi diperlukan untuk menentukan Z dengan persamaan (26). Sebagai perkiraan harga Z dalam iterasi dapat diambil $Z = 0.9$ atau $Z = 1$. Harga Z yang didapat dibandingkan dengan harga Z sebelumnya sampai tercapai konvergensi.

III. PENENTUAN TEKANAN INLET DAN OUTLET PIPA SERTA DIAMETER PIPA DARI PERSAMAAN ALIRAN

Bentuk implisit persamaan (11) dan (16) tidak dapat menentukan tekanan inlet, outlet atau diameter pipa

dilakukan secara eksplisit. Oleh karena itu diperlukan suatu prosedur iterasi untuk perhitungan tersebut, yaitu menggunakan prosedur iterasi Newton-Raphson, yaitu:

$$X_{i+1} = X_i - \frac{f(X_i)}{f'(X_i)} \quad (27)$$

dengan:

$$f(X) = \left(\frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g \sin \alpha} + \frac{C_1 D}{C_3 f} \right) \ln \left[\frac{C_3 f W^2 + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1^2}{C_3 f W^2 + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_2^2} \right] - \frac{C_1 2D}{C_3 f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) - L \quad (28)$$

untuk pipa non horizontal, dan:

$$f(X) = \frac{DA^2 g_c M_g}{C_3 f W^2 ZRT} (P_1^2 - P_2^2) - \frac{2C_1 D}{C_3} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) - L \quad (29)$$

untuk pipa horizontal.

Pada tiga persamaan di atas, "X" adalah parameter yang akan ditentukan.

A. Penentuan Tekanan Inlet

• Pipa non-horizontal:

$$f'(P_1) = \left(\frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g \sin \alpha} + \frac{C_1 D}{C_3 f} \right) \left(\frac{2M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1 \right) - \frac{C_1 2D}{C_3 f P_1} \quad (30)$$

• Pipa horizontal :

$$f'(P_1) = \frac{2DA^2 g_c M_g}{C_3 f W^2 ZRT} (P_1) - \frac{2C_1 D}{C_3 f P_1} \quad (31)$$

B. Penentuan Tekanan Outlet

• Pipa non-horizontal:

$$f'(P_2) = \left(\frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g \sin \alpha} + \frac{C_1 D}{C_3 f} \right) \left(\frac{2M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_2 \right) - \frac{C_1 2D}{C_3 f P_2} \quad (32)$$

• Pipa horizontal:

$$f'(P_2) = \frac{2DA^2 g_c M_g}{C_3 f W^2 ZRT} (P_2) - \frac{2C_1 D}{C_3 f P_2} \quad (33)$$

Untuk menentukan tekanan *inlet* maupun tekanan *outlet*, sifat fisik gas dihitung pada setiap tahap iterasi berdasarkan harga tekanan *inlet* atau *outlet* yang didapat dari iterasi sebelumnya. Sebagai perkiraan awal untuk tekanan *inlet* adalah tekanan *outlet*-nya dan sebaliknya. Untuk suatu harga tekanan *inlet* dan laju alir yang diketahui, maka dengan menggantikan harga panjang pipa dengan bermacam-macam harga untuk mendapatkan tekanan *outlet* pipa, maka suatu distribusi tekanan sepanjang pipa dapat dengan mudah ditentukan.

C. Penentuan Diameter Pipa

- Pipa non horizontal

$$f'(D) = \left(\frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g g \sin \alpha} + \frac{C_1 D}{C_2 f} \right) \left[\left(\frac{\frac{5C_3 fW^2}{C_2 2D^2 A^2}}{\frac{C_3 fW^2}{C_2 2DA^2} + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_2^2} \right) - \left(\frac{\frac{5C_3 fW^2}{C_2 2D^2 A^2}}{\frac{C_3 fW^2}{C_2 2DA^2} + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1^2} \right) \right]$$

$$\left(\frac{C_1}{C_3 f} \right) \ln \left[\frac{\frac{C_3 fW^2}{C_2 2DA^2} + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_1^2}{\frac{C_3 fW^2}{C_2 2DA^2} + \frac{M_g^2 g \sin \alpha}{Z^2 R^2 T^2} P_2^2} \right] - \frac{C_1}{C_3} \frac{2}{f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (34)$$

- Pipa horizontal:

$$f'(D) = \frac{5A^2 g_c M_g}{C_3 fW^2 ZRT} (P_1^2 - P_2^2) - \frac{2C_1}{C_3 f} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (35)$$

Pada penurunan dua persamaan di atas, luas penampang pipa (A) juga diturunkan terhadap diameter. Sedangkan harga faktor gesekan dihitung pada setiap tahap iterasi berdasarkan harga diameter yang didapat dari iterasi sebelumnya.

IV. PERUMUSAN ALGORITMA

A. Hukum Aliran Gas Dalam Jaringan

Aliran *steady state* gas dalam jaringan pipa memenuhi dua hukum dasar, yaitu Hukum Kirchoff I atau Hukum kontinuitas aliran pada *node* dan *Hukum Kirchoff II* atau Hukum kekekalan energi pada rangkaian tertutup.

Hukum Kirchoff-I menyatakan bahwa jumlah aljabar aliran yang menuju suatu *node* dalam jaringan termasuk *supply* atau *demand* pada *node* tersebut sama dengan nol, atau secara matematis dapat ditulis:

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} + Q_i = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (36)$$

dimana:

- i = *Node* ke-i dalam jaringan,
- ij = Cabang ke-j yang berhubungan dengan *node* ke-i (cabang ke-ij),
- L_i = Jumlah cabang yang berhubungan dengan *node* ke-i,
- N = Jumlah *node* dalam jaringan,
- Q_{ij} = Laju alir gas dalam cabang ke-ij (MMSCFD),
- Q_i = *Supply* (+) atau *demand* (-) pada *node* ke-I (MMSCFD).

Sebagai catatan, aliran dalam *leg* yang menuju suatu *node*-i dianggap positif terhadap *node* tersebut, dan sebaliknya. Konsekuensi dari Hukum Kirchoff-I adalah jumlah aljabar *supply* dan *demand* dalam jaringan haruslah juga sama dengan nol, atau:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad (37)$$

Hukum Kirchoff-II menyatakan bahwa jumlah aljabar penurunan tekanan (*pressure drop*) dalam rangkaian tertutup (*close loop*) sama dengan nol.

$$\sum_{j=1}^{L_i} \Delta P_{ij} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (38)$$

dimana:

- i = *Loop* ke-i dalam jaringan,
- ij = Cabang ke-j yang terdapat dalam *loop* ke-i (cabang ke-ij),
- L_i = Jumlah cabang dalam *loop* ke-I,
- ΔP_{ij} = Penurunan tekanan pada cabang ke-ij,
- M = Jumlah *loop* bebas dalam jaringan.

Dalam analisis jaringan dengan model jaringan *nodal*, masalah jaringan yang dianalisis direpresentasikan dengan menuliskan persamaan kontinuitas pada masing-masing *node*. Sistem persamaan aljabar *non linier* yang terbentuk kemudian dipecahkan bersama-sama dengan penentuan laju alir gas dalam masing-masing pipa dengan persamaan aliran. Dengan demikian secara implisit Hukum Kirchoff- II juga akan terpenuhi dalam analisis ini.

B. Prosedur Iterasi

Dalam analisa nodal, diperlukan inisialisasi harga tekanan pada masing-masing node yang tekanannya tidak diketahui. Dengan harga tekanan inisialisasi tersebut, laju alir massa gas dalam semua cabang yang berhubungan dengan *node-i* dihitung dengan persamaan aliran gas dalam pipa. Kemudian dihitung *error* yang terjadi pada *node-i* tersebut, yaitu :

$$error_i = \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} + Q_i \quad (39)$$

Jika $error_i$ sama dengan nol berarti persamaan kontinuitas pada *node-i* telah terpenuhi. Jika harganya lebih besar dari nol berarti harga tekanan pada node tersebut kurang dari yang seharusnya, sehingga ada massa gas lebih yang mengalir menuju *node* tersebut, dan sebaliknya. Berdasarkan harga $error_i$ tersebut, harga tekanan pada *node-i* dikoreksi dengan persamaan berikut :

$$P_i^{(k+1)} = P_i^{(k)} + \beta_i (error_i) \quad (40)$$

di mana:

$P_i^{(k+1)}$ = Harga tekanan pada *node-i* setelah dikoreksi (harga tekanan yang akan digunakan pada iterasi ke-k+1)

$P_i^{(k)}$ = Harga tekanan pada node *i* sebelum dikoreksi (iterasi ke-k),

β_i = Faktor akselerasi pada node ke-i (psia/MMSCFD).

Jika *node-i* merupakan *node* acuan dengan *supply* atau *demand* tak diketahui, maka *supply* atau *demand*-nya yang dihitung, yaitu dengan persamaan:

$$Q_i = -\frac{1}{\rho_g} \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} \quad (41)$$

Kemudian perhitungan diteruskan ke *node* berikutnya (*node* ke-i+1) sampai semua *node* dalam jaringan dihitung (*i* = N). Setelah itu (pada akhir iterasi ke-k) dihitung jumlah *error total absolute* pada semua node dalam jaringan. Jika harga *error total absolute* lebih besar dari *error* yang ditoleransi (persamaan 42) terpenuhi, maka proses perhitungan diulangi lagi (iterasi ke-k+1). Jika tidak, berarti konvergensi telah tercapai.

$$|error_i^{(k)}| < \varepsilon \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (42)$$

Salah satu keunggulan dari algoritma ini adalah tak diperlukannya matriks aljabar untuk merepresentasikan masalah jaringan yang dianalisis, sehingga mudah diimplementasikan pada jaringan yang besar dan kompleks.

C. Penentuan Faktor Akselerasi

Faktor akselerasi yang digunakan pada persamaan (40) pada dasarnya merupakan suatu faktor konversi untuk mengubah ketidakseimbangan laju aliran gas menjadi harga penambahan (*increment*) tekanan yang diperlukan untuk tercapainya keseimbangan massa. Harga faktor akselerasi yang dipilih adalah harga faktor akselerasi dinamik yang berbeda pada setiap *node*-nya dan selalu berubah-ubah pada setiap tahap iterasinya.

Cara termudah untuk menentukan faktor konversi ini adalah dengan menghitung *ratio* antara beda tekanan inlet dan outlet pipa dengan laju alir dalam pipa tersebut. Karena sebuah *node* umumnya dihubungkan dengan beberapa pipa secara bersama-sama, maka ada banyak *ratio* pada setiap nodenya dan ketidakseimbangan laju aliran gas dapat disebabkan oleh satu atau beberapa pipa secara bersama-sama. Alternatif yang cukup baik adalah dengan mengambil harga *ratio* minimum dari semua *ratio* yang ada pada *node* tersebut, seperti diberikan pada persamaan berikut:

$$\beta_i = \min \left(\frac{P_{1ij} - P_{2ij}}{Q_{ij}} \right) \quad j = 1, 2, 3, \dots, L_i \quad (43)$$

Adakalanya selama proses iterasi harga faktor akselerasi yang ditentukan dengan persamaan (43) menjadi sangat kecil. Ini berakibat proses koreksi tekanan menjadi sangat lambat, sehingga konvergensi menjadi lambat pula. Untuk menghindari hal ini, maka dalam program komputer yang dibuat diberikan suatu harga ambang (*threshold value*) untuk faktor akselerasi. Jika selama proses iterasi harga faktor akselerasi menjadi lebih kecil dari harga ambang tersebut, maka harga ambang tersebut yang digunakan sebagai faktor akselerasinya.

D. Garis Pedoman untuk Analisis Nodal Jaringan Gas

Karena analisis jaringan gas pada dasarnya merupakan pemecahan sekumpulan persamaan aljabar non-linier (persamaan kontinuitas), maka

penentuan *input* data dalam analisis sangatlah penting. Kesalahan dalam penentuan *input* data ini akan menyebabkan solusi yang didapat bukan merupakan solusi yang unik atau solusi yang hanya satu-satunya dan memenuhi persamaan kontinuitas yang ditulis untuk tiap *node* dalam jaringan.

Garis pedoman (*guidelines*) telah disusun bagi penentuan *input* data dalam analisis jaringan gas. Garis pedoman tersebut adalah:

1. Sekurang-kurangnya terdapat suatu variabel yang tak diketahui dalam tiap *node* dalam jaringan, yaitu tekanan saja atau aliran saja.
2. Sekurang-kurangnya satu harga tekanan *node* mesti diketahui dalam jaringan yang dianalisis.

Walaupun garis pedoman di atas hanya merupakan syarat cukup (*sufficient condition*) dan bukan merupakan syarat perlu (*necessary condition*) dalam analisis jaringan pipa, akan tetapi sangat berguna dalam menentukan data *input* pada analisis jaringan pipa tersebut.

E. Input Data bagi Analisis Jaringan Gas

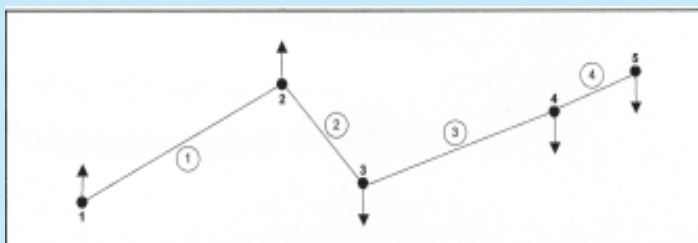
Input data yang diperlukan bagi analisa jaringan gas dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Jumlah *node* yang ada dalam jaringan (N),
2. Jumlah *leg* yang ada dalam jaringan,
3. Besar toleransi *error* yang diinginkan (epsilon untuk persamaan 42),
4. Harga ambang untuk faktor akselerasi,
5. Data *Node*,

Data *Node* meliputi data tekanan pada *node* yang diketahui (*psia*), data aliran pada *node* (*supply/demand*) yang diketahui (*MMSCFD*), data suhu tiap *node* ($^{\circ}\text{F}$) serta data ketinggian atau elevasi tiap *node* (*feet*).

6. Data *Leg*,

Data *leg* meliputi data nomor *leg*, beserta nomor *node* pada ujung-ujung tiap *leg*, diameter *leg* (dalam *inch*), panjang *leg* (dalam *feet*), kekasaran



Gambar 3
Gambar jaringan pipa gas untuk Contoh 1

Tabel 1
Data masukan contoh 1

1. Data Gas

Temperatur aliran (F) : 60.0
Berat Molekul (lbm/lbm-mole) : 17.0
Viskositas (cp) : 0.021

2. Data untuk Perhitungan

Epsilon (*error max.*) : 0.001

3. Data Node

Jumlah node : 5

Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Status node
1	375.0	15.00	100.00	0
2	0.0	15.00	180.00	0
3	0.0	-10.00	125.00	0
4	0.0	-10.00	160.00	0
5	0.0	-10.00	230.00	0

4. Data Elemen Pipa

Jumlah Elemen Pipa : 4

Rata – rata efisiensi sistem jaringan pipa : 0.9

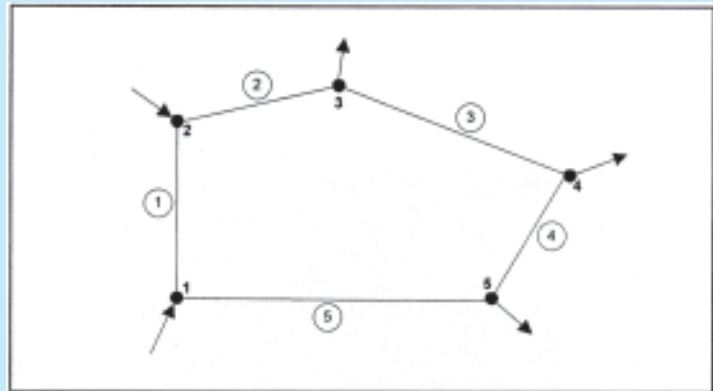
Leg	Dari node	Ke node	Diameter inch	Panjang feet	Roughness inch
1	1	2	8.00	5000.0	0.0006
2	2	3	10.00	3000.0	0.0006
3	3	4	8.00	6000.0	0.0006
4	4	5	6.00	1500.0	0.0006

absolute leg (dalam *inch*), faktor effisiensinya (dalam *persen*) dan berat molekul gas yang mengalir dalam tiap *leg*.

Diagram alir perhitungan untuk menganalisis jaringan pipa gas dengan menggunakan algoritma sederhana yang telah dijelaskan di atas dapat dilihat Gambar 2.

V. CONTOH ANALISIS JARINGAN PIPA GAS

Dalam tulisan ini akan diberikan 2 (dua) contoh kasus jaringan pipa gas berikut ini:



Gambar 4
Gambar jaringan pipa gas untuk contoh 2

Tabel 2
Hasil perhitungan contoh 1

Data Gas

Densitas (SC)	: 0.044788 lbm/ft ³
Viskositas	: 0.021000 cp
Berat Molekul	: 17.00000 lbm/lbm-mole
Temperatur	: 60.00000 F
Iterasi ke	: 159
Total error	: 0.000995 MMSCFD

Node	Tekanan psia	Supply/ Demand MMSCFD	Error MMSCFD	Betha psia/ (lbm/det)	Elevasi feet
1	375,0000	150.000	0.0000	0.0000	100.00
2	369,2426	150.000	0.0003	0.2480	180.00
3	365,2612	-100.000	0.0003	0.2781	125.00
4	355,4033	-100.000	0.0002	0.6501	160.00
5	352,6613	-100.000	0.0003	0.5290	230.00

Leg	Laju Alir MMSCFD	Aliran Dari Ke	Diameter inch	Panjang feet	Roughness inch	Friction
1	15,0000	1 2	8.00	5000.00	0.00060	0.01600479
2	30,0000	2 3	10.00	3000.00	0.00060	0.01521152
3	20,0000	3 4	8.00	6000.00	0.00060	0.01582230
4	10,0000	4 5	6.00	1500.00	0.00060	0.01674092

Pada contoh-1 ini jaringan pipa terdiri atas 5 *node* dan 4 *leg* dengan elevasi antara 100 *feet* sampai dengan 230 *feet*. Temperatur aliran, parameter sifat fisik gas (berat molekul dan viskositas gas), dimensi pipa (diameter, panjang dan kekasaran pipa), laju alir gas dan efisiensi sistem jaringan pipa terdapat pada Tabel 1. Sedangkan skema jaringan pipa gas dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil perhitungan yang diperoleh dari contoh ini terdapat pada Tabel 2, yang menunjukkan jumlah total iterasi hingga mencapai konvergen pada langkah ke 159 dengan total *error* sebesar 0.000995 MMSCFD. Disamping perkiraan distribusi tekanan pada ke-5 *node*, diperoleh juga faktor gesekan (*friction*) dari 4 *leg* yang dialiri gas.

• **Contoh-2**

Contoh jaringan pipa ini membentuk satu loop yang terdiri dari 5 *node* dan 5 *leg* dengan elevasi yang sama sebesar 100 *feet*. Skema jaringan pipa gas ini dapat dilihat pada Gambar 4 berikut. Temperatur aliran, parameter sifat fisik gas (berat molekul dan viskositas gas), dimensi pipa (diameter, panjang dan kekasaran pipa), laju alir gas dan efisiensi sistem jaringan pipa terdapat pada Tabel 3. Sedangkan hasil perhitungan yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 4, yang menunjukkan jumlah total iterasi sehingga mencapai konvergen pada langkah ke 136 dengan total *error* sebesar 0.000995 MMSCFD. Juga

dapat diperkirakan distribusi tekanan pada ke-5 *node* dan laju alir setiap *leg* serta faktor gesekan (*friction*) dari ke-5 *leg* tersebut.

VI. KESIMPULAN

- a. Pemilihan perbandingan antara selisih tekanan *inlet* dan *outlet* pipa dengan laju alir massa gas sebagai faktor akselerasi sangat penting untuk mengurangi jumlah iterasi yang diperlukan dalam perhitungan komputasi.
- b. Simulator jaringan pipa gas ini dapat digunakan untuk membantu mendesain dan mengevaluasi jaringan pipa gas yang kompleks.

Tabel 3
Data masukan Contoh 2

Berat molekul (lbm/lbm-mole)	: 17.0				
Viskositas (cp)	: 0.021				
2. Data untuk perhitungan					
Epsilon (<i>error max.</i>)	: 0.001				
3. Data Node					
Jumlah <i>node</i>	: 5				
Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Status node	
1	375.0	15.00	100.00	0	
2	0.0	15.00	100.00	0	
3	0.0	-10.000	100.00	0	
4	0.0	-10.000	100.00	0	
5	0.0	-10.000	100.00	0	
4. Data elemen pipa					
Jumlah elemen pipa	: 5				
Rata – rata efisiensi sistem jaringan pipa	: 1.0				
Leg	Dari node	Ke node	Diameter inch	Panjang feet	Roughness inch
1	1	2	9.00	5000.0	0.0006
2	2	3	10.00	3000.0	0.0006
3	3	4	9.00	6000.0	0.0006
4	4	5	9.00	1500.0	0.0006

Tabel 4
Hasil perhitungan contoh 2

Data Gas					
Densitas (SC)	:	0.044788 lbm/ft ³			
Viskositas	:	0.021000 cp			
Berat molekul	:	17.00000 lbm/lbm-mole			
Temperatur	:	40.00000 °F			
Iterasi ke	:	136			
Total error	:	0.000995 MMSCFD			

Node	Tekanan psia	Supply/Demand MMSCFD	Error MMSCFD	Betha psia/(lbm/det)	Elevasi
1	375,0000	150.000	0.0000	0.0000	100.00
2	374,9658	150.000	0.0000	0,0428	100,00
3	373,9886	-100.000	0,0001	0,1140	100,00
4	373,4088	-100.000	0,0005	0,0250	100,00
5	373,4535	-100.000	0,0004	0,0250	100,00

Leg	Laju Alir MMSCFD	Aliran Dari Ke	Diameter inch	Panjang feet	Roughness inch	Friction
1	1,5420	1 2	9,00	5000.00	0.00060	0,01852791
2	165.421	2 3	10,00	3000.00	0.00060	0,01296512
3	65.421	3 4	9,00	6000.00	0.00060	0,01449059
4	3,4577	4 5	9,00	1500.00	0.00060	0,01327809
5	13,4572	4 5	10,00	7000,00	0.00060	0,01327809

c. Algoritma sederhana Tian-Adewumi untuk menganalisis jaringan pipa gas dengan model jaringan *nodal* dapat dikembangkan untuk mengikutsertakan komponen non-pipa seperti kompresor dan regulator tanpa harus mengubah secara mendasar algoritma tersebut.

VII. DAFTAR SIMBOL

- A = luas penampang, inch²
- D = diameter pipa, inch
- f = faktor gesekan
- f_a = faktor gesekan yang sesungguhnya,
- g = percepatan gravitasi, ft/detik²
- L = panjang pipa salur, ft

- M_g = berat molekul gas
- N = jumlah total *node*
- p = tekanan, psia
- P_c = tekanan kritis, psia
- P_r = tekanan *reduced*
- P₁ = tekanan masuk, psia
- P₂ = tekanan keluar, psia
- Q = laju alir volumetrik gas (pada sc) ft³/detik
- R = konstanta gas
- T = temperatur, °F
- T_c = temperatur kritis, °F
- T_r = temperatur *reduced*

V = kecepatan gas, ft/detik
 W = laju alir massa gas didalam pipa, lb/detik
 Z = faktor kompresibilitas gas
 α = sudut kemiringan pipa
 β = faktor percepatan
 ε = toleransi
 μ = viskositas gas, cp
 η_{pipa} = faktor efisiensi pipa
 ρ_o = densitas gas (pada sc, lb/ft³)
sc = kondisi standar

KEPUSTAKAAN

1. Tian, S. and Adewumi, M.A., 1993, " Simple Algorithm for Analyzing Gas Pipeline Networks, " *paper SPE 25475* presented at SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, March 21-23.
2. Tian, S. and Adewumi, M.A., 1994," Development of Analytical Design Equation for Gas Pipeline, " SPE Production and Facilities, May.
3. Ahmed, T., 1989, "Hydrocarbon Phase Behavior", Gulf Pub.Co. Houston Texas.
4. Beggs, H.D., 1984, " Gas Production Operation", OGI Publications, Tulsa Oklahoma.
5. Berar, G.P. and Eliason, B.G., 1978, "An Improve Gas Transmission Sistem Simulator", SPE Journal, December, pp 389-398.
6. Ikoku, C.U., 1984, "Natural Gas Production Engineering", John Wiley & Son Inc., New York.
7. Szilas, A.P., 1986, "Production and Transportation of Oil and Gas – Part B : Gathering and Transportation", 2nd Completely Rev. Ed.,Elsevier, New York.
8. Stoner, MA, "Sensivity Analysis Applied to Steady State Model of Natural Gas Transportation System", SPE Journal.