

Aplikasi Model Jaringan Nodal untuk Mengevaluasi Aliran Gas pada Jaringan Pipa

Oleh: **Edward ML Tobing**

Peneliti Muda pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, P.O. Box 1089/JKT, Jakarta Selatan 12230 INDONESIA

Teregistrasi I Tanggal 20 Februari 2009; Diterima setelah perbaikan tanggal 24 Maret 2009

Disetujui terbit tanggal: 16 September 2009

SARI

Analisis aliran *steady state* pada jaringan pipa gas dilakukan untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada *node* dan laju alir gas dalam elemen penghubung *node (leg)*. Metode analisis aliran *steady state* pada jaringan pipa gas yang diaplikasikan dalam makalah ini merupakan algoritma yang bersifat *step forward*. Dalam metode ini harga tekanan suatu *node* langsung dikoreksi pada setiap iterasinya berdasarkan ketidakseimbangan laju alir massa pada *node* tersebut, karena harga tekanan yang digunakan untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa pada tahap iterasi sebelumnya belum tepat. Algoritma ini memberikan kemungkinan baru untuk mengembangkan model simulasi jaringan pipa gas tanpa menggunakan matriks aljabar, dan pemecahan masalah jaringan pipa gas dengan mengaplikasikan model jaringan *nodal*.

Untuk mendesain dan menganalisis jaringan pipa yang dilengkapi peralatan kompresor dan *pressure regulator*, perlu ditentukan parameter daya kuda yang dibutuhkan Kompresor dan bukaan pada *pressure regulator*. Cara yang dilakukan untuk menganalisis jaringan pipa tersebut adalah dengan mengeliminasi kedua peralatan tersebut, dan kemudian menempatkan dua buah *node* pada titik *inlet* dan *outlet*. Akan tetapi sistem harus mempunyai solusi yang unik setelah kedua peralatan tersebut dieliminasi, dengan batasan laju alir gas pada *node inlet* harus sama dengan laju alir pada *node outlet* dengan tanda berbeda. Tekanan dan laju alir pada kedua *node* harus ditentukan terlebih dahulu, dan kemudian parameter daya kuda kompresor serta bukaan *pressure regulator* dapat ditentukan.

Kata kunci: model jaringan Nodal, aliran gas pada jaringan pipa

ABSTRACT

Steady state gas flow analysis in a pipeline network is conducted to determine flowing gas pressure distribution at nodes and gas flowing rate between nodes. The method for analyzing steady state flow in a pipeline network applied in this paper is step-forward algorithm. The pressure at a node will be directly corrected at any iteration based on mass flow rate overbalance at that node in this method, because the pressure that is used for determining mass flow rate of gas at pipeline at the previous node was wrong. This algorithm gives new possibility for developing simulation model of gas pipeline without using algebraic matrices and solving gas pipeline problem using nodal network model.

In order to design and analyze pipeline network that is equipped with compressor and pressure regulator, there is a need to determine required horsepower for compressor and opening for pressure regulator. The method for analyzing that pipeline network is by eliminating both equipments and then placing two nodes at the inlet and outlet. However, the system should have a unique solution after both equipment are eliminated so that inlet gas flow rate should be equal with outlet gas flow rate with different sign. The pressure and gas flow rate at both nodes should be defined first and then horsepower for compressor and opening for pressure regulator can be determined.

Keyword: nodal network model, gas flow at pipeline network

I. PENDAHULUAN

Sistem pelanggan gas merupakan sistem transportasi gas yang dapat diandalkan, aman dan ekonomis. Jika terjadi kerusakan pada sistem tersebut, maka akan menyebabkan hilangnya sebagian fluida gas atau berkurangnya kapasitas aliran yang dapat membahayakan keselamatan manusia ataupun merusak lingkungan. 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 optimum, dengan demikian pasokan gas ke konsumen dapat dijamin.

Pengembangan desain jaringan pipa gas yang optimum berdasarkan suatu kriteria tertentu dan pelaksanaannya cukup ekonomis dan rasional, hanya mungkin dilakukan dengan 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 pengambilan keputusan desain dan operasi sistem jaringan pipa yang sebenarnya.

Karakteristik aliran fluida gas di dalam pipa terdiri dari aliran *steady state* dan aliran *unsteady state* atau transient. Meskipun 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 sistem transportasi gas yang baru maupun pengembangan atau modifikasi sistem transportasi gas yang telah terpasang. Analisis *steady state* jaringan pipa gas ditujukan untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada setiap *node* dan laju alir gas setiap elemen penghubung (*leg*). Analisis ini harus memenuhi hukum kontinuitas aliran pada setiap *node* dan hukum kekekalan energi pada rangkaian tertutup.

Analisis *steady state* pada jaringan pipa gas dapat dilakukan dengan tiga metode analisis, yaitu metode analisis Nodal, Loop dan Loop-Node. Pada umumnya metoda yang digunakan dalam analisis *steady state* jaringan pipa gas, baik menggunakan metoda analisis *Nodal*, *Loop* maupun *Loop-Node* dengan cara mempresentasikan sistem jaringan pipa menggunakan sekumpulan persamaan aljabar nonlinier yang dikemas dalam bentuk matriks aljabar dan kemudian diselesaikan dengan cara implisit dan eksplisit. Konsekuensi logis dari hal diatas adalah harus

melakukan berbagai teknik manipulasi untuk memperoleh waktu eksekusi dan kapasitas komputer yang minimal.

Metode analisis *steady state* jaringan pipa gas dengan algoritma *step-forward* yang dikembangkan oleh Tian-Adewuni, memberikan alternatif baru untuk model simulasi analisis *steady state* jaringan pipa gas tanpa menggunakan matriks aljabar, dan tergolong dalam analisis model jaringan *Nodal* yang sederhana. Prinsip dasar yang digunakan adalah mengoreksi harga tekanan pada setiap *node* atau menghitung pasokan (*supply*) dan permintaan (*demand*) berdasarkan ketidakseimbangan laju alir massa gas yang terjadi pada setiap tahap iterasi sampai memenuhi hukum kontinuitas aliran pada setiap *node* dan hukum kekekalan energi pada rangkaian tertutup suatu jaringan pipa.

Peralatan Kompresor dan Pressure Regulator adalah elemen nonpipa yang pada umumnya terdapat pada jaringan pipa gas. Untuk dapat mengendalikan penggunaan kedua peralatan di atas, maka perlu dilakukan analisis terhadap jaringan pipa sehingga penggunaannya optimum. Dalam mendesain sistem jaringan pipa yang menggunakan peralatan Kompresor dan Pressure regulator, maka perlu mengetahui daya kuda kompresor dan bukaan *pressure regulator*.

II. ALGORITMA JARINGAN

Jaringan pipa dapat terdiri dari beberapa bagian atau segmen pipa yang disebut sebagai "*leg*", dan sambungan antarpipa sebagai titik terminal disebut sebagai "*Node*". Persamaan kontinuitas untuk masing-masing *node* dalam jaringan yang menerapkan Hukum Kirchoff-I adalah :

$$\sum_{j=1}^{l_i} W_{ij} + (Q_i \rho_o) = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

di mana l_i adalah jumlah pipa yang tersambung ke *node* i , dan n adalah jumlah *node* pada sistem jaringan. W_{ij} adalah laju alir massa pada pipa ke- j yang tersambung ke *node* i . Q_i adalah laju alir *supply* gas atau *demand* pada kondisi standard untuk *node* i . Notasi untuk aliran menuju *node* adalah positif dan meninggalkan *node* adalah negatif. Sedangkan notasi untuk *supply* adalah positif dan *demand* adalah negatif. Dan ρ_o adalah densitas gas pada kondisi standard.

Persamaan eksplisit yang menyatakan laju alir sebagai fungsi tekanan adalah sebagai berikut:

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

di mana

$$y = \frac{\frac{2C_1 D}{C_3 f} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + L}{\frac{C_1 D}{C_3 f} + \frac{g_c ZRT}{2C_2 M_g g \sin \alpha}} \quad (3)$$

Pada persamaan (2) dan (3) di atas, satuan P adalah *psia*, D dalam *inch*, A dalam *in²*, W dalam *lb/detik*, T dalam *°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 "L" dalam satuan *feet*.

Untuk pipa horizontal, persamaan laju alir dapat disederhanakan menjadi:

$$W = \frac{DA^2 g_c M_g (P_1^2 - P_2^2)}{C_3 f ZRT \left(\frac{2C_1 D}{C_3 f} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + L \right)} \quad (4)$$

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

$$Q_{sc} = C_4 \frac{W}{\rho_{sc}} = C_4 \frac{WRT_{sc}}{M_g P_{sc}} \quad (5)$$

dimana :

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

A. Karakteristik Faktor Gesekan

Faktor gesekan (f) yang diperlukan untuk menentukan laju alir massa gas dalam pipa dengan persamaan (2) atau persamaan (4), 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 diperoleh ditentukan besarnya faktor gesekan. Metode yang digunakan untuk menentukan faktor

gesekan adalah korelasi Chen. N. H, berikut ini:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{(e/D)}{3.7056} - \frac{5.0452}{N_{Re}} \log \left[\frac{(e/D)^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{N_{Re}^{0.8981}} \right] \right] \quad (6)$$

di mana

$$N_{Re} = \frac{20011 \gamma_g Q_{sc}}{D \mu_g} \quad (7)$$

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 %, maka harga faktor gesekan yang sesungguhnya, f_a harus dikoreksi dengan persamaan:

$$\frac{1}{\sqrt{f_a}} = \eta_{pipa} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (8)$$

B. Karakteristik Sifat Fisik Gas

Pendekatan dalam perhitungan sifat-sifat fisik gas yang merupakan fungsi tekanan dan suhu, dapat digunakan harga rata-rata tekanan dan suhu *inlet* dan *outlet* pipa. Harga viskositas gas yang akan digunakan untuk menentukan bilangan Reynold dihitung berdasarkan korelasi Lee-Gonzales dan Eakin⁹.

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

$$P_r = \frac{\bar{P}}{P_c} = \frac{P_1 + P_2}{2P_c} \quad (9)$$

$$T_r = \frac{\bar{T}}{T_c} = \frac{T_1 + T_2}{2T_c} \quad (10)$$

Untuk menentukan harga tekanan dan suhu kritis (P_c dan T_c) digunakan korelasi Standing⁴, sedangkan harga faktor kompresibilitas ditentukan dengan korelasi Dranchuk-Abu Kassem⁴.

III. PERSAMAAN ALIRAN GAS MELEWATI KOMPRESOR

Persamaan yang menggambarkan hubungan antara tekanan *inlet*, tekanan *outlet* dan *horsepower* dengan laju alir gas pada kompresor adalah sebagai berikut:

$$Q_{sc} = \frac{11.9 \frac{HP \eta_{comp}}{T_1 Z} \left(\frac{n-1}{n} \right)}{\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1} \quad (11)$$

di mana

Q_{sc} = laju alir volume gas yang melewati kompresor (MMSCFD)

$$Q_{sc} = - Q_{inlet} = Q_{outlet}$$

A. Persamaan Aliran Gas Melewati Pressure Regulator

Aliran gas melalui pressure regulator dapat dimodelkan sebagai aliran gas melewati suatu hambatan (*restriction*). Pola aliran gas melewati suatu hambatan dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu aliran yang mempunyai kecepatan yang sama dengan kecepatan suara, dan disebut sebagai aliran kritis. Serta aliran yang mempunyai kecepatan dibawah kecepatan suara disebut sebagai aliran subkritis. Pada aliran kritis tekanan *inlet* tidak mempengaruhi tekanan outlet, dan laju alir gas yang terjadi hanya bergantung pada tekanan inlet. Sedangkan pada aliran subkritis, laju alir gas akan bergantung pada tekanan *inlet* maupun tekanan *outlet*.

Aliran gas yang melewati suatu hambatan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

(12)

di mana:

r = P_2/P_1 , untuk aliran subkritis ($P_2/P_1 > R_{pc}$)

r = R_{pc} , untuk aliran kritis ($P_2/P_1 \leq R_{pc}$)

P_1 = Tekanan pada sisi upstream (*inlet*) hambatan

P_2 = Tekanan pada sisi downstream (*outlet*) hambatan

R_{pc} = Harga perbandingan tekanan *outlet* dan *inlet* yang menyebabkan aliran gas menjadi kritis

D_{R-64} = Bukaan atau diameter hambatan (per 64 inci).

Harga rasio tekanan yang membuat aliran gas menjadi

kritis bergantung pada harga n seperti diberikan oleh persamaan berikut:

$$R_{pc} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad (13)$$

IV. URUTAN LANGKAH KERJA

A. Aliran Gas Dalam Jaringan Pipa

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:

$$\sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} + Q_i = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

di mana:

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:

$$\sum_{i=1}^N Q_i = 0 \quad (15)$$

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

$$\sum_{j=1}^{L_i} \Delta P_{ij} = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (16)$$

di mana:

i = *Loop* ke- i dalam jaringan,

- ij = Cabang ke-j yang terdapat dalam loop ke-i (cabang ke-ij),
- Li = Jumlah cabang dalam loop ke-I,
- DP_{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 nonlinier 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. Langkah Kerja Iterasi

Dalam analisis *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:

$$error_i = \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} + Q_i \quad (17)$$

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:

$$P_i^{(k+1)} = P_i^{(k)} + \beta_i (error_i) \quad (18)$$

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 *de-*

mand-nya yang dihitung, yaitu dengan persamaan:

$$Q_i = -\frac{1}{\rho_g} \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} \quad (19)$$

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 20) terpenuhi, maka proses perhitungan diulangi lagi (iterasi ke-k+1). Jika tidak, berarti konvergensi telah tercapai.

$$|error_i^{(k)}| < \varepsilon \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (20)$$

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. Faktor Percepatan

Faktor akselerasi yang digunakan pada persamaan (18) 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:

$$\beta_i = \min \left(\frac{P_{1ij} - P_{2ij}}{Q_{ij}} \right) \quad j = 1, 2, 3, \dots, L_i \quad (21)$$

Adakalanya selama proses iterasi harga faktor

akselerasi yang ditentukan dengan persamaan (21) 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 Analisis

Karena analisis jaringan gas pada dasarnya merupakan pemecahan sekumpulan persamaan aljabar nonlinier (persamaan kontinuitas), maka penentuan data *input* dalam analisis sangatlah penting. Kesalahan dalam penentuan data *input* 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 data *input* 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.

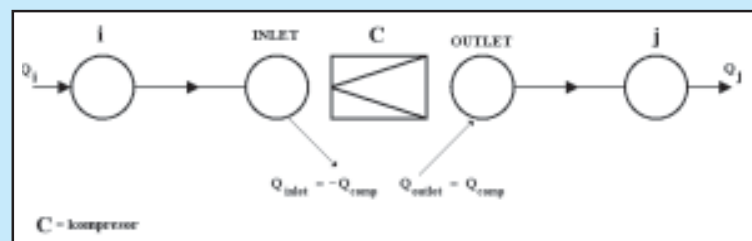
E. Pemodelan Kompresor

Untuk menganalisis atau mendesain jaringan pipa yang mempunyai komponen kompresor, posisi suatu *leg* digantikan oleh kompresor dengan menambahkan dua buah *node*, yaitu pada *suction* (*inlet*) dan *discharge* (*outlet*). Bagan posisi kompresor dapat dilihat pada

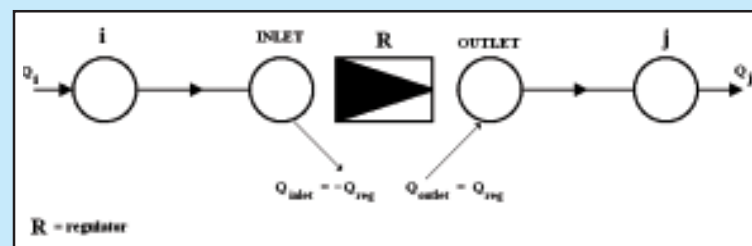
Gambar 1. Jumlah aliran yang menuju *node suction* kompresor haruslah sama dengan jumlah aliran yang keluar dari *node discharge*. Dalam analisis aliran gas yang melewati kompresor diberi tanda positif untuk *node discharge* dan negatif untuk *node suction*.

Parameter penting yang berhubungan dengan kompresor adalah tekanan *suction* (P_1), tekanan *discharge* (P_2), laju alir (Q), dan *horsepower* (HP). Dalam mendesain pada umumnya HP yang akan ditentukan, sedangkan minimal satu dari tiga parameter lainnya harus diketahui. Dalam hal ini parameter yang diketahui disebut sebagai *mode* operasi yang diberikan pada kompresor. Program komputer yang dikembangkan dapat menangani 5 macam *mode* operasi pada kompresor terdiri dari:

- *Mode 1*
Pengaturan pada Tekanan *suction* (P_1) dan laju alir (Q),
- *Mode 2*
Pengaturan pada Tekanan *discharge* (P_2) dan laju alir (Q),
- *Mode 3*



Gambar 1
Pemodelan kompresor dalam analisis jaringan pipa gas



Gambar 2
Pemodelan regulator dalam analisis jaringan pipa Gas

Pengaturan pada dan Laju alir (Q),

- Mode 4

Pengaturan pada Tekanan suction (P_1),

- Mode 5

Pengaturan pada Tekanan discharge (P_2).

Langkah evaluasi yang dilakukan pada masing-masing *node* adalah seperti *node* lainnya, baik langkah koreksi terhadap tekanan maupun perhitungan faktor akselerasinya. Pada perhitungan *error*, aliran gas yang melewati kompresor bertanda positif terhadap *node* discharge dan negatif terhadap *node* suction. Pada akhir analisis setelah tekanan suction, tekanan discharge dan laju alir yang melewati kompresor diketahui, *horsepower* yang dibutuhkan oleh kompresor tersebut dapat ditentukan dengan persamaan (11).

F. Pemodelan Regulator

Dalam menganalisis atau mendesain jaringan pipa, regulator dimodelkan seperti kompresor, yaitu dengan mengeliminasi regulator dari jaringan dan posisinya digantikan dengan dua buah *node* pada *inlet* dan *outlet*-nya. Mode operasi yang didefinisikan juga ada 5 macam seperti kompresor. Pada regulator tak terdapat parameter horsepower, akan tetapi pada regulator terdapat parameter bukan (D_{R-64}), yaitu diameter regulator yang terbuka untuk aliran gas. Proses perhitungan *error*, pengoreksian tekanan maupun perhitungan faktor akselerasinya adalah sama seperti kompresor.

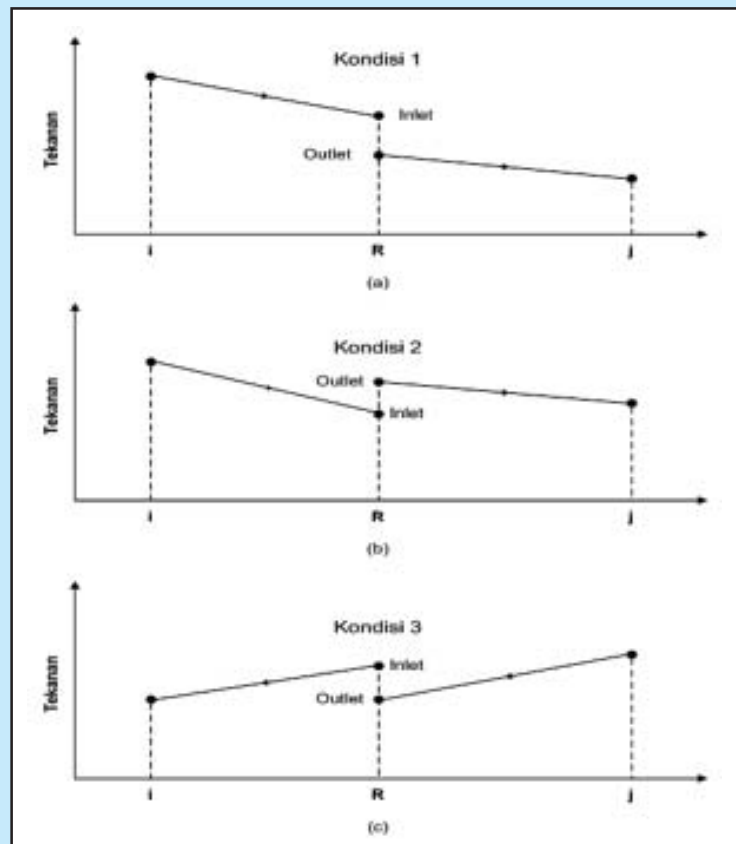
Pada akhir analisis, kemungkinan akan terjadi beberapa kondisi tekanan (sebagai ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 3, dengan penjelasan sebagai berikut:

1. $P_i > P_{inlet} > P_{outlet} > P_j$ (kondisi 1)

Jika terjadi kondisi seperti ini, berarti regulator beroperasi normal. Aliran gas akan terjadi dari *node* $i \rightarrow$ *node* inlet \rightarrow *node* outlet \rightarrow *node* j .

2. $P_i > P_{inlet}, P_{outlet} > P_j, P_{outlet} > P_{inlet}$ (kondisi 2)

Jika terjadi kondisi ini berarti tekanan setting yang



Gambar 3
Kemungkinan kondisi tekanan pada regulator

diberikan pada regulator terlalu tinggi. Analisis dapat diulangi dengan menggantikan posisi regulator dengan sebuah *node* dengan aliran sama dengan nol dan tekanan tak diketahui (dihitung). Tekanan dikoreksi dengan cara seperti *node* lainnya.

3. $P_{outlet} < P_j$ (kondisi 3)

Jika terjadi kondisi ini berarti terjadi aliran balik gas dari sisi *downstream* regulator menuju sisi *upstream*-nya. Pada kasus ini regulator dapat dimodelkan sebagai *check valve* yang mencegah terjadinya aliran balik. Prosedur analisa diulangi lagi dengan memberikan harga aliran gas yang melewati regulator sama dengan nol (*mode* 3). Proses koreksi tekanan padakedua *node* dilakukan dengan cara yang sama seperti *node* lainnya.

Pada akhir analisis, setelah parameter tekanan dan laju alir pada regulator diketahui, bukaan regulator tersebut dapat ditentukan dengan persamaan (12).

G. Input Data

Data input data yang diperlukan untuk analisis jaringan pipa salur terdiri atas:

1. Jumlah *node* yang ada dalam jaringan (N),
2. Jumlah *leg* yang ada dalam jaringan,
3. Jumlah kompresor dalam jaringan (NComp),
4. Jumlah regulator (Nreg)
5. Besar toleransi *error* yang diinginkan (epsilon untuk persamaan - 20),
6. Harga ambang untuk faktor akselerasi,
7. Data *node* meliputi data tekanan pada *node* yang diketahui (dalam *psia*), termasuk tekanan *inlet* atau *outlet* kompresor dan regulator yang diketahui, data aliran pada *node* (*supply/demand*) yang diketahui (dalam *MMSCFD*), data temperatur tiap *node* (dalam °F) serta data ketinggian atau elevasi tiap *node* (dalam *feet*).
8. Data *leg* meliputi data nomor *leg*, beserta nomor *node* pada ujung-ujung tiap *leg*, diameter *leg* (dalam *inchi*), panjang *leg* (dalam *Feet*), kekasaran absolute *leg* (dalam *inchi*), faktor efisiensinya (dalam *persen*) dan berat molekul gas yang mengalir dalam tiap *leg*.
9. Data kompresor dan regulator bergantung pada *mode* operasinya, ditambah data nomor *node inlet* dan *outletnya* serta perbandingan panas jenis gas. Untuk data tekanan dan suhu *node inlet* atau *outlet* kompresor atau regulator diberikan di dalam kelompok data *node*.

H. Langkah Kerja Perhitungan

Secara ringkas langkah kerja analisis jaringan pipa salur, dapat dijelaskan berikut ini:

1. Input data dan inisialisasi tekanan pada *node*. Di sini sebagai tekanan inisial pada suatu *node* diambil harga tekanan rata-rata dari semua harga tekanan yang diketahui ditambah dengan perkalian antara harga ambang faktor akselerasi dengan aliran pada *node* tersebut. Untuk tekanan *inlet* kompresor harganya adalah harga tekanan *outletnya* dibagi 1.2. Dan untuk tekanan *inlet* regulator adalah harga tekanan *outlet* dikali 1.2.
2. Melakukan proses *loop* pada *node* ($i = 1, 2, 3, \dots, N$).
3. Jika *node* i adalah sebagai acuan dengan *supply* atau *demand* diketahui, maka lanjutkan ke langkah 19.

4. Melakukan proses *loop* pada *leg* yang berhubungan dengan *node* ke- i ($j = 1, 2, 3, \dots, L_i$).
5. Inisialisasi harga faktor gesekan pada *leg* j (diambil 0.015).
6. Menentukan harga rata-rata faktor kompresibilitas gas.
7. Menentukan rata-rata viskositas gas dalam *leg* j .
8. Menentukan laju alir volume gas dalam *leg* j dengan persamaan (5), setelah terlebih dahulu ditentukan laju alir massanya dengan persamaan (2) atau (4).
9. Menentukan bilangan Reynold dengan persamaan (7).
10. Menentukan faktor gesekan dengan persamaan (6), kemudian dikoreksi dengan persamaan (8).
11. Menentukan *error* absolut dari faktor gesekan. Sampai harganya lebih kecil dari *error* yang ditoleransi.
12. Ulangi mulai langkah (5), sampai laju alir dalam semua *leg* yang berhubungan dengan *node* ke- i ditentukan ($j = L_i$).
13. Tentukan jumlah total aliran dalam *leg* yang berhubungan dengan *node* i , atau:

$$\sum Q_{ij}, j = 1, 2, 3, \dots, L_i$$

14. Jika *node* i merupakan *inlet* atau *outlet* elemen *nonpipe*, maka lanjutkan ke bagian proses untuk elemen nonpipa, kemudian lanjutkan ke langkah 16.
15. Jika *node* i tekananya diketahui maka lanjutkan ke langkah 18.
16. Seleksi faktor akselerasi pada *node* i dengan persamaan (21).
17. Perbaharui tekanan *node* i dengan persamaan (18). Lanjutkan ke langkah 19.
18. Tentukan aliran pada *node* i dengan persamaan (19).
19. Ulangi mulai langkah 2 sampai semua *node* dapat ditentukan ($i = N$).
20. Hitung *error* total absolut pada semua *node*, sampai harganya lebih kecil dari *error* yang ditoleransi (persamaan - 20) terpenuhi.
21. Jika dalam jaringan terdapat regulator, maka lanjutkan ke bagian tahap pengecekan kondisi

tekanan dan aliran pada regulator. Jika tidak lanjutkan ke langkah 23.

22. Jika semua regulator beroperasi normal, maka lanjutkan ke langkah 23. Jika tidak, maka ulangi mulai dari langkah 2.
23. Hitung *Horsepower* kompresor dengan persamaan -11, dan diameter bukaan regulator dengan persamaan -12.

Proses perhitungan untuk kompresor dan regulator adalah sebagai berikut :

1. Jika *mode* kompresor atau regulator adalah mode 1 maka jika *node* *i* merupakan *node outlet*nya, maka laju alir gas dalam elemen nonpipa tersebut terhadap *node* *i* diset bertanda positif. Perhitungan *error*nya adalah :

$$error_{outlet} = \sum Q_{outlet,j} + Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{outlet}$$

2. Jika *mode* kompresor atau regulator adalah mode 2 maka jika *node* *i* merupakan *node inlet*nya, maka laju alir gas dalam elemen nonpipa tersebut terhadap *node* *i* diset bertanda negatif, sehingga:

$$error_{inlet} = \sum Q_{inlet,j} - Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{inlet}$$

3. Jika *mode* kompresor atau regulator adalah mode 3 maka jika *node* *i* merupakan *node outlet*nya, maka laju alir gas dalam elemen nonpipa tersebut terhadap *node* *i* diset bertanda positif, sehingga:

$$error_{outlet} = \sum Q_{outlet,j} + Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{outlet}$$

jika *node* *i* merupakan *node inlet*nya, maka laju alir gas dalam elemen nonpipa diset bertanda negatif terhadap *node* *i* tersebut.

$$error_{inlet} = \sum Q_{inlet,j} - Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{inlet}$$

4. Jika *mode* kompresor atau regulator adalah mode 4 maka jika *node* *i* merupakan *node inlet*nya, maka laju alir gas dalam elemen non pipa tersebut dianggap sama dengan total aliran yang menuju *node outlet* adalah sama dengan laju alir tersebut, sehingga tekanan pada *node outlet* dapat dikoreksi seperti *node* lainnya. Atau secara matematis:

$$Q_{comp} = \sum Q_{inlet,j}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{inlet}$$

$$error_{outlet} = \sum Q_{outlet,j} + Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{outlet}$$

5. Jika *mode* kompresor atau regulator adalah mode 5 maka jika *node* *i* merupakan *node outlet*, maka laju alir gas dalam elemen nonpipa tersebut dianggap sama dengan negatif total aliran yang keluar dari *node outlet* tersebut, atau:

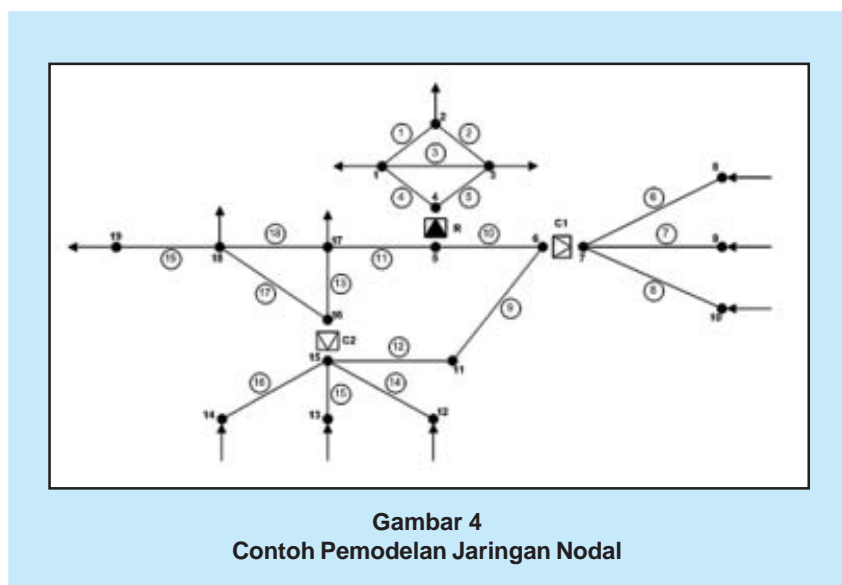
$$Q_{comp} = -\sum Q_{outlet,j}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{outlet}$$

$$error_{inlet} = \sum Q_{inlet,j} - Q_{comp}, j = 1, 2, 3, \dots, L_{inlet}$$

Jadi tekanan *node inlet*nya dapat dikoreksi seperti pada *node* lainnya.

I. Tahap Pengecekan Kondisi Tekanan dan Aliran pada Regulator

1. Jika tekanan *node inlet* > tekanan *node outlet*, dan total aliran yang menuju *node inlet* adalah positif dan total aliran yang keluar dari *node outlet* adalah negatif, berarti regulator beroperasi normal (kondisi-1).
2. Jika tekanan *node inlet* < tekanan *node outlet*, dan total aliran yang menuju *node inlet* adalah positif dan total aliran yang keluar dari *node outlet* adalah negatif, berarti regulator tidak beroperasi sebagaimana seharusnya. Hal ini disebabkan karena tekanan yang diberikan terlalu tinggi. Dalam kasus ini, analisis harus diulangi dengan terlebih dahulu menggantikan posisi regulator dengan sebuah *node* dan dengan tekanan



Gambar 4
Contoh Pemodelan Jaringan Nodal

Tabel 1
Data masukan contoh : 1

Jumlah Total Node : 19
 Jumlah Total Leg : 19
 Jumlah Total Kompresor : 2
 Jumlah Total Regulator : 1
 Epsilon (maxs error) : 0.001
 Harga threshold betha : 0.001

Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Suhu °F
1	-	-15.0	0.0	40
2	-	-20.0	0.0	40
3	-	-24.0	0.0	40
4	350.0	0.0	0.0	40
5	-	0.0	0.0	70
6	1200.0	0.0	0.0	40
7	-	0.0	0.0	80
8	400.0	50.0	0.0	40
9	-	65.0	0.0	80
10	-	65.0	0.0	40
11	-	-45.0	0.0	40
12	400.0	75.0	0.0	40
13	-	65.0	0.0	40
14	-	55.0	0.0	45
15	-	0.0	0.0	75
16	1000.0	0.0	0.0	40
17	-	-75.0	0.0	40
18	-	-75.0	0.0	40
19	-	-121.0	0.0	40

Leg	Aliran		Diameter inch	Panjang feet	Kekasaran inch	Efisiensi %	MWg
	Dari	Ke					
1	1	2	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
2	2	3	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
3	3	1	24.0	74670.0	0.000757	100	17.0
4	1	4	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
5	3	4	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
6	7	8	24.0	158200.0	0.000757	100	17.0
7	9	7	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
8	7	10	24.0	52800.0	0.000757	100	17.0
9	11	6	30.0	212132.0	0.000757	100	17.0
10	6	5	32.0	150000.0	0.000757	100	17.0
11	17	5	32.0	150000.0	0.000757	100	17.0
12	11	16	32.0	150000.0	0.000757	100	17.0
13	16	17	32.0	150000.0	0.000757	100	17.0
14	15	12	30.0	8000.0	0.000757	100	17.0
15	13	15	30.0	8000.0	0.000757	100	17.0
16	14	15	30.0	8000.0	0.000757	100	17.0
17	16	18	32.0	250000.0	0.000757	100	17.0
18	17	18	32.0	200000.0	0.000757	100	17.0
19	19	18	32.0	200000.0	0.000757	100	17.0

Comp	Node inlet	Node outlet	Laju alir MMSCFD	Eff	Cpv
1	7	6	180.0	90.0	1.333
2	15	16	195.0	90.0	1.333

Reg	Node inlet	Node outlet	Laju alir MMSCFD	Cpv
1	5	4	59.0	1.333

Tabel 2
Hasil perhitungan contoh : 1

Hasil perhitungan

Tanggal : 6 - 2 - 2009 Waktu : 11 : 2 : 45
 Jumlah iterasi : 166
 Total Error (MMSCFD) : 0.000967
 Waktu Eksekusi (detik) : 26

Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Suhu °F	Error MMSCFD	Catatan
1	349.32965	-15.10000	0.00	40.0	0.000000	-
2	349.22804	-20.00000	0.00	40.0	0.000000	-
3	349.30916	-24.00000	0.00	40.0	0.000000	-
4	350.00000	0.00000	0.00	40.0	0.000000	Outlet Reg 1
5	1109.74767	0.00000	0.00	70.0	0.000000	Inlet Reg 1
6	1200.00000	0.00000	0.00	40.0	0.000000	Outlet Komp 1
7	394.91530	0.00000	0.00	80.0	0.000306	Inlet Komp 1
8	400.00000	50.00000	0.00	40.0	0.000000	-
9	397.86221	65.00000	0.00	80.0	0.000323	-
10	397.72259	65.00000	0.00	40.0	0.000339	-
11	1082.14799	-45.00000	0.00	40.0	0.000000	-
12	400.00000	75.00000	0.00	40.0	0.000000	-
13	399.57001	65.00000	0.00	40.0	0.000000	-
14	399.20276	55.00000	0.00	45.0	0.000000	-
15	398.18866	0.00000	0.00	75.0	0.000000	Inlet Komp 2
16	1000.00000	0.00000	0.00	40.0	0.000000	Outlet Komp 2
17	1023.25890	-75.00000	0.00	40.0	0.000000	-
18	1004.20784	-75.00000	0.00	40.0	0.000000	-
19	1001.42260	-121.00000	0.00	40.0	0.000000	-

Leg	Aliran		Laju alir MMSCFD	Pres drop psia	Kecepatan feet/detik	Faktor gesekan
	Dari	Ke				
1	2	1	10.61096	-0.10161	39.09228	0.01373745
2	3	2	9.38904	0.08112	34.59057	0.01400758
3	3	1	3.65320	-0.02049	13.45889	0.01652604
4	4	1	29.26415	0.67035	107.81330	0.01192961
5	4	3	29.73585	0.69084	109.55109	0.01190688
6	7	8	50.00066	-5.08470	184.20953	0.01130215
7	9	7	64.99968	2.94691	239.46805	0.01106167
8	10	7	64.99966	2.80729	239.46799	0.01102923
9	11	6	735.33822	-117.85201	1733.81797	0.00962756
10	5	6	885.82082	-90.25233	1835.71305	0.00951324
11	17	5	826.82082	86.48878	1713.44558	0.00952457
12	11	16	690.33822	82.14799	1627.71467	0.00963661
13	17	16	422.28771	23.25890	875.11948	0.00972921
14	15	12	75.00000	-1.81134	176.83883	0.01091116
15	15	13	65.00000	-1.38135	153.26032	0.01107192
16	15	14	55.00000	-1.01410	129.68181	0.01128008
17	18	16	133.53311	4.20784	276.72468	0.01044350
18	18	17	329.53311	19.05106	682.90135	0.00983976
19	19	18	121.00000	-2.78523	250.75193	0.01053260

Lanjutan
Tabel 2
Hasil perhitungan contoh : 1

Leg	Diameter inch	Panjang feet	Kekasaran inch	Efisiensi %	MWg
1	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
2	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
3	24.000	74670.0	0.000757	100	17.0
4	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
5	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
6	24.000	158200.0	0.000757	100	17.0
7	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
8	24.000	52800.0	0.000757	100	17.0
9	30.000	212132.0	0.000757	100	17.0
10	32.000	150000.0	0.000757	100	17.0
11	32.000	150000.0	0.000757	100	17.0
12	30.000	150000.0	0.000757	100	17.0
13	32.000	150000.0	0.000757	100	17.0
14	30.000	80000.0	0.000757	100	17.0
15	30.000	80000.0	0.000757	100	17.0
16	30.000	80000.0	0.000757	100	17.0
17	32.000	250000.0	0.000757	100	17.0
18	32.000	200000.0	0.000757	100	17.0
19	32.000	200000.0	0.000757	100	17.0

Comp	Tek inlet psia	Tek outlet psia	Laju alir MMSCFD	Comp ratio	Horsepower HP	Cpv	Eff %
1	394.9153	1200.0000	180.0000	3.0386	10392.0049	1.333	90.00
2	398.1887	1000.0000	195.0000	2.5114	9144.6400	1.333	90.00

Reg	Tek inlet psia	Tek outlet psia	Laju alir MMSCFD	Diameter /64 inch	Cpv	Kondisi operasi	Pola aliran
1	1109.7477	350.0000	59.0000	93.7262	1.333	Normal	Kritis

tidak diketahui serta laju alir sama dengan nol (kondisi 2).

- Jika tekanan *node inlet* > tekanan *node outlet*, akan tetapi total aliran yang keluar dari *node outlet* adalah positif (aliran gas menuju *node outlet*), berarti regulator beroperasi sebagai *check valve*. Analisis harus diulangi dengan terlebih dahulu menentukan *mode* regulator dengan *mode-3*, dan aliran sama dengan nol (kondisi - 3).

V. CONTOH PEMODELAN JARINGAN NODAL

Dalam tulisan ini akan diberikan satu contoh kasus jaringan pipa salur gas yang dilengkapi elemen non pipa kompresor dan regulator berikut ini:

Pada contoh-1 ini jaringan pipa terdiri dari 19

node, 19 leg, 2 Kompresor dan 1 regulator. Suhu aliran, parameter sifat fisik gas (berat molekul dan viskositas gas), dimensi pipa (diameter, panjang dan kekasaran pipa), laju alir gas, efisiensi sistem jaringan pipa dan parameter yang berkaitan dengan kompresor serta regulator terdapat pada Tabel 1. Sedangkan skema jaringan pipa gas dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil perhitungan yang diperoleh dari contoh ini terdapat pada Tabel 2, yang menunjukkan jumlah total iterasi hingga mencapai konvergen pada langkah ke 166 dengan total error sebesar 0.000967 MMSCFD. Hasil perhitungan terdiri dari perkiraan distribusi tekanan pada 19 *node*, faktor gesekan (*friction factor*) dari 19 leg yang dialiri gas, *inlet* dan *outlet* tekanan serta *Horse Power* dari kompresor, *inlet-outlet* tekanan dan bukaan atau diameter *pressure regulator*.

VI. KESIMPULAN

- a. Cara penomoran *node* untuk *node inlet* dan *outlet* kompresor atau *pressure regulator* yang dioperasikan dengan *mode* pengaturan pada tekanan *inlet* atau *outlet* akan mempengaruhi jumlah iterasi yang diperlukan dalam perhitungan. Dengan memberi nomor *node inlet* yang lebih kecil dari *node outlet* untuk tekanan *inlet* yang konstan dan memberi nomor *node outlet* dengan nomor yang lebih kecil dari *node inlet* untuk tekanan *outlet* yang konstan, maka jumlah iterasi yang diperlukan akan berkurang.
- b. Harga tekanan awal yang diberikan pada *node* sangat berpengaruh terhadap jumlah iterasi yang diperlukan dalam perhitungan. Jika perubahan tekanan yang diberikan oleh kompresor atau *pressure regulator* tidak terlalu besar, maka penggunaan harga tekanan rata-rata pada semua *node* sebagai acuan tekanan awal sudah cukup memadai.

VII. DAFTAR SIMBOL

A	= luas penampang, inch ²
C _d	= koefisien <i>discharge</i> (diambil = 0.865)
C _v	= panas jenis gas pada volume tetap (BTU/lbm - °R)
C _p	= panas jenis gas pada tekanan tetap (BTU/lbm - °R)
D	= diameter pipa, inci
f	= faktor gesekan
f _a	= faktor gesekan yang sesungguhnya,
g	= percepatan gravitasi, ft/detik ²
HP	= daya kuda (<i>horse power</i>) kompresor
L	= panjang pipa salur, ft
M _g	= berat molekul gas
N	= jumlah total <i>node</i>
n	= perbandingan panas jenis gas (C _p /C _v)
p	= tekanan, psia
P _c	= tekanan kritis, psia
P _r	= tekanan tereduksi
P ₁	= tekanan masuk (kompresor, hambatan), psia
P ₂	= tekanan keluar (kompresor, hambatan), psia

Q _{sc}	= laju alir volumetris gas (pada <i>standard condition</i>) ft ³ /detik
R	= konstanta gas
T	= suhu, °F
T _r	= suhu tereduksi
V	= kecepatan gas, ft/detik
W	= laju alir massa gas di dalam pipa, lb/detik
Z	= faktor kompresibilitas gas
\bar{Z}	= faktor kompresibilitas gas rata-rata (<i>suction</i> dan <i>discharge</i> kompresor)
α	= sudut kemiringan pipa
β	= faktor percepatan
ε	= toleransi
μ	= viskositas gas, cp
η _{pipa}	= faktor efisiensi pipa
η _{comp}	= efisiensi kompresor
ρ _o	= densitas gas (pada sc, lb/ft ³)
sc	= kondisi standar

KEPUSTAKAAN

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