Pengembangan Model Kompresor pada Jaringan Pipa Gas yang Komplek

Oleh:
Edward ML Tobing

S A R I

Model simulasi jaringan pipa salur gas yang komplek dikembangkan dengan anggapan aliran dalam pipa adalah *steady state*. Analisis aliran *steady state* dalam jaringan pipa gas tersebut dilakukan untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada setiap "*node*" dan laju alir pada setiap"leg", dengan mengetahui sekurang-kurangnya satu harga tekanan node serta *supply* atau *demand* pada node lainnya. Untuk mendesain dan menganalisis sistem jaringan pipa yang komplek dengan adanya peralatan kompresor, posisi leg digantikan oleh kompressor dengan menambahkan dua buah node, yaitu pada *suction* (*inlet*) dan discharge (*outlet*). Model simulasi ini kemudian dapat menghitung daya kuda (*horse power*) kompresor yang diperlukan untuk mengalirkan gas ke konsumen.

Kata kunci : model kompresor, jaringan pipa gas.

ABSTRACT

Model of complex pipeline network simulation gas has been developed by assume flow in pipeline is steady state. 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. For designing and analyzing the complex pipeline network system with device compressor, leg position is substitute with compressor and adds two nodes in suction (inlet) and discharge (outlet). This model also determination of horse power compressor for distribution gas to the consumer.

Keyword : model of compressor, the pipeline network.

I. PENDAHULUAN

Untuk dapat menjamin pasokan gas bagi konsumen dengan biaya yang memadai, perlu dirancang sistem jaringan pipa gas secara optimal. Rancangan sistem jaringan pipa gas tersebut akan optimal hanya mungkin dilakukan dengan menggunakan model simulasi jaringan pipa gas. Pengembangan model simulasi pada jaringan pipa gas yang komplek adalah untuk meramalkan kinerja jaringan pipa dibawah kondisi operasi yang berbeda-beda. Peramalan ini dapat digunakan sebagai panduan dalam pengambilan keputusan merancang dan pengoperasian sistem jaringan pipa yang akan dipasang. Aliran fluida gas di dalam pipa pada umumnya terdiri dari aliran *steady state* dan *transient*. Pada kenyataannya aliran *steady state* di dalam pipa jarang terjadi, akan tetapi simulasi jaringan pipa pada kondisi aliran *steady state* berguna bagi perencanaan sistem transportasi gas yang baru maupun modifikasi sistem transportasi gas yang telah terpasang. Analisis *steady state* pada jaringan pipa gas adalah untuk menentukan distribusi tekanan aliran gas pada tiap *node* dan laju alir gas setiap elemen penghubung *node* (*leg*). Dalam suatu jaringan pipa gas yang komplek biasanya ditemui peralatan atau elemen non pipa seperti kompresor. Agar dapat mengendalikan penggunaan elemen tersebut, maka perlu dilakukan analisis terhadap jaringan pipa sehingga dalam penggunaannya akan diperoleh hasil yang optimal. Dan untuk dapat mendesain sistem jaringan pipa yang menggunakan peralatan kompresor, maka perlu menentukan daya kuda kompresor tersebut.

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

Pengembangan model jaringan pipa gas yang komplek dalam makalah ini menggunakan persamaan analitik *Tian-Adewumi[1)]* yang menggambarkan aliran fluida *compressible* tanpa mengabaikan bentuk energi kinetik. *Tian-Adewumi[2)]* menyederhanakan urutan langkah kerja perhitungan dengan menggunakan persamaan analitik. Metoda ini termasuk urutan langkah kerja *step-forward* tanpa menggunakan matriks aljabar. 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 hukum aliran gas dalam jaringan pipa.

II. ALGORITMA JARINGAN

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

$$\sum_{j=1}^{l_i} Wij + (Q_i\ \rho_o) = 0 \qquad i = 1, 2, \ldots\ldots n \qquad (1)$$

dimana 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_{od} adalah densitas gas pada kondisi *standard*.

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

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

dimana,

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

Pada persamaan (2) dan (3) di atas, satuan *P* adalah *psia*, *D* dalam *inch*, *A* dalam in^2, *W* dalam *lb/detik*, *T* dalam ^oR, *g* merupakan percepatan gravitasi (*feet/detik*^{2}) 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:

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

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

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

dimana : C4 = 0.0864 ; P_{sc} = 14.7 psia ; T_{sc} = 60 ^{o}F (520 ^{o}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:

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

dimana:

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

Harga "f" yang dihitung lalu dibandingkan dengan harga "f" sebelumnya sampai tercapai konvergensi.

Penentuan faktor gesekan dengan persamaan menganggap bahwa effisiensi pipa sama dengan 100 %, maka harga faktor gesekan yang sesungguhnya, f_a harus dikoreksi dengan persamaan:

$$\frac{1}{\sqrt{f_a}} = \eta_{pipa} \frac{1}{\sqrt{f}}$$

(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 *Eakin* [9].

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

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

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

Untuk menentukan harga tekanan dan suhu kritis (P_c dan T_c) digunakan korelasi *Standing*[4], sedangkan harga faktor kompresibilitas ditentukan dengan korelasi *Dranchuk-Abu Kassem*[4].

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 :

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

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

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

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 :

$$i = 1, 2, 3, \ldots, N \qquad (12)$$

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 :

$$\sum_{i=1}^{N} Q_i = 0 \qquad (13)$$

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

$$\sum_{j=1}^{L_i} \Delta P_{ij} = 0 \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, N \qquad (14)$$

dimana :

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,

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

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-masig *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. *Langkah Kerja 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 :

$$error_i = \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} + Q_i \qquad (15)$$

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 :

$$P_i^{(k+1)} = P_i^{(k)} + \beta_i (error_i) \qquad (16)$$

dimana :

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

Pi(k) = Harga tekanan pada node *i* sebelum dikoreksi (iterasi ke-k),

βi = 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:

$$Q_i = -\frac{1}{\rho_g} \sum_{j=1}^{L_i} Q_{ij} \qquad (17)$$

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

$$\left| error_i^{(k)} \right| < \varepsilon \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, N \qquad (18)$$

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.

D. *Faktor Percepatan*

Faktor Akselerasi yang digunakan pada persamaan (16) 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 :

$$\beta_j = \min \left(\frac{P_{1ij} - P_{2ij}}{Q_{ij}} \right) \quad j = 1, 2, 3, .., Li \qquad (19)$$

Adakalanya selama proses iterasi harga faktor akselerasi yang ditentukan dengan persamaan (41)

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

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 non linier (persamaan kontinuitas), maka penentuan *input* data dalam analisa 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 analisa 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 jarinan yang dianalisa.

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 kompressor 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

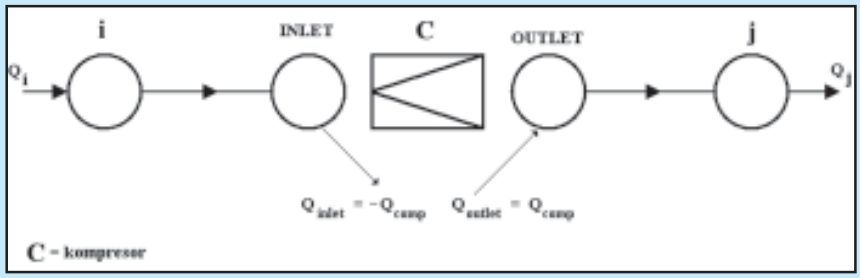
  Pengaturan pada Tekanan discharge (P_2) dan laju alir (Q),
- Mode 3

  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



Gambar 1
Pemodelan kompresor dalam analisis jaringan pipa salur yang komplek

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

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. *Input Data*

Input data yang diperlukan untuk analisis jaringan pipa salur terdiri dari :

1. Jumlah node yang ada dalam jaringan (N),
2. Jumlah leg yang ada dalam jaringan,
3. Jumlah kompresor dalam jaringan (NComp),
4. Besar toleransi error yang diinginkan (epsilon untuk persamaan - 18),
5. Harga ambang untuk faktor akselerasi,

   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 ^{o}F) serta data ketinggian atau elevasi tiap node (dalam *feet*).

   Data leg meliputi data nomer leg, beserta nomor node pada ujung-ujung tiap leg, diameter leg (dalam *inchi*), panjang leg (dalam *feet*), kekasaran absolute leg (dalam *inchi*), faktor effisiensinya (dalam *persen*) dan Berat Molekul gas yang mengalir dalam tiap leg.
6. Data kompresor bergantung pada mode operasinya, ditambah data nomer node inlet dan outletnya serta perbandingan panas jenis gas. Untuk data tekanan dan suhu node inlet atau outlet kompresor diberikan di dalam kelompok data node.

G. *Langkah Kerja Perhitungan*

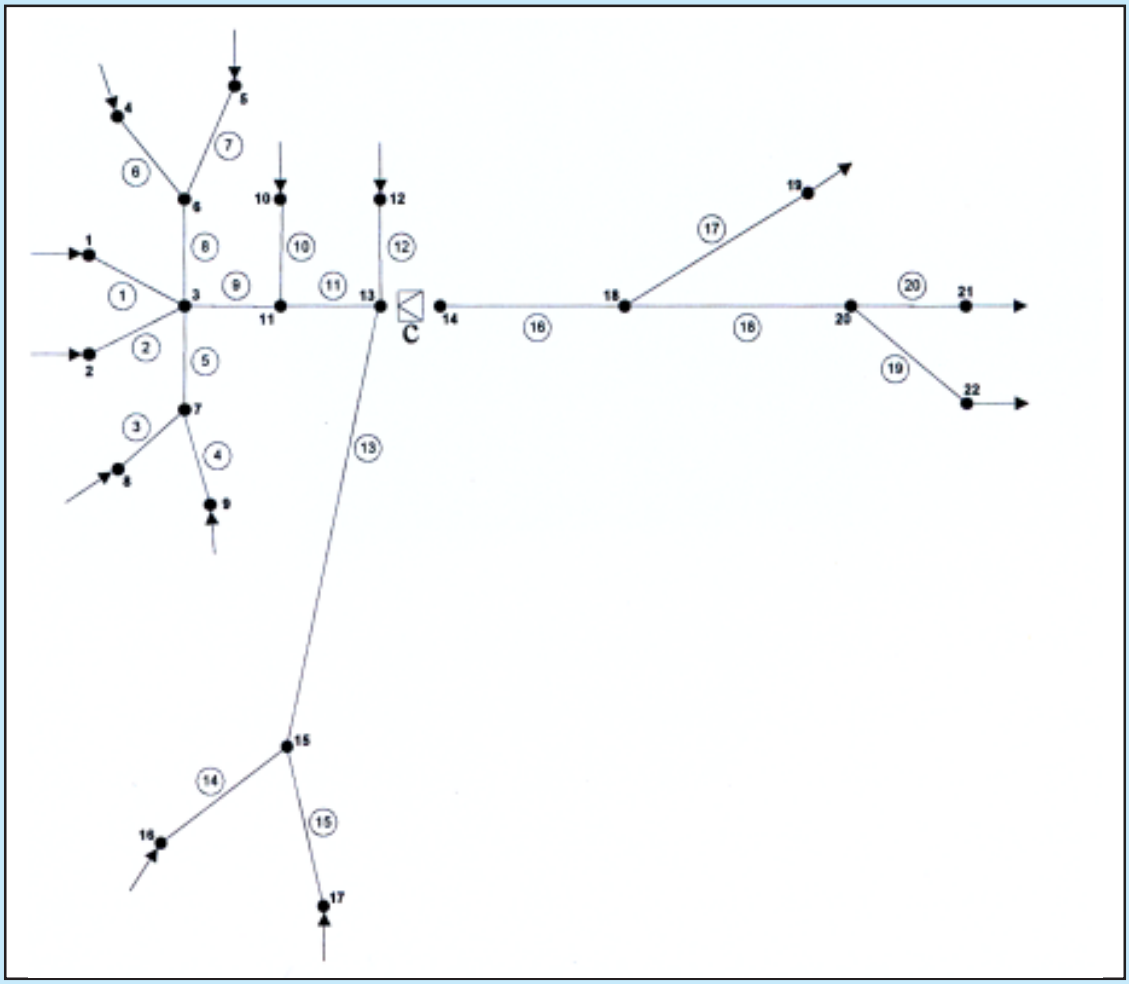
Secara ringkas langkah kerja analisis jaringan pipa salur yang komplek dapat dijelaskan berikut ini :

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.
2. Melakukan proses loop pada node (i = 1, 2, 3, ..., 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, ..., L_i).
5. Inisialisai 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 :

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

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 (19).
17. Perbaharui tekanan node i dengan persamaan (16). Lanjutkan ke langkah 19.
18. Tentukan aliran pada node i dengan persamaan (17).
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 - 18) terpenuhi.

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60



Gambar 2
Contoh Pemodelan kompresor pada jaringan pipa gas yang komplek

21. Hitung *Horsepower* kompresor dengan persamaan-11, dan selesai.

Proses perhitungan untuk kompresor adalah sebagai berikut :

1. Jika mode kompresor adalah mode 1 maka jika node i merupakan node outletnya, maka laju alir gas dalam elemen non pipa tersebut terhadap node i diset bertanda positif. Perhitungan errornya adalah :

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

2. Jika mode kompresor adalah mode 2 maka jika node i merupakan node inletnya, maka laju alir gas dalam elemen non pipa tersebut terhadap node i diset bertanda negatif, sehingga:

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

3. Jika mode kompresor adalah mode 3 maka jika node i merupakan node outletnya, maka laju alir gas dalam elemen non pipa tersebut terhadap node i diset bertanda positif, sehingga :

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

jika node i merupakan node inletnya, maka laju alir gas dalam elemen non pipa diset bertanda negatif terhadap node i tersebut.

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

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

4. Jika mode kompresor adalah mode 4 maka jika node i merupakan node inletnya, 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 :

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

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

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

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

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

Jadi tekanan node inletnya dapat dikoreksi seperti pada node lainnya.

V. CONTOH PEMODELAN KOMPRESOR PADA JARINGAN PIPA GAS

Dalam tulisan ini akan diberikan satu contoh kasus jaringan pipa salur gas yang komplek dan terdapat komponen kompresor berikut ini :

Pada contoh-1 ini jaringan pipa terdiri dari 22 node, 20 leg dan 1 Kompresor dengan elivasi 100 feet. Suhu 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 2. Hasil perhitungan yang diperoleh dari contoh ini terdapat pada Tabel 2, yang menunjukkan jumlah total iterasi hingga mencapai konvergen pada langkah ke 1799 dengan total error sebesar 0.000992 MMSCFD. Disamping perkiraan distribusi tekanan pada ke-22 *node*, diperoleh juga faktor gesekan (*friction)* dari 20 *leg* yang dialiri gas. Dan juga inlet dan outlet serta Horse Power dari kompresor.

VI. KESIMPULAN

a. Urutan langkah kerja yang dikembangkan oleh Tian-Adewumi untuk menganalisis jaringan pipa gas dengan model jaringan nodal dapat diterapkan pada jaringan pipa yang memiliki elemen non pipa seperti kompresor.

b. Penentuan tekanan awal pada suatu node sangat berpengaruh terhadap jumlah iterasi yang diperlukan dalam langkah analisisnya. Jika perubahan tekanan yang diberikan oleh kompresor tidak terlalu besar atau jika jaringan yang dianalisis hanya terdiri dari elemen pipa, maka penggunaan harga rata-rata seluruh node sebagai acuan tekanan awalnya sudah cukup memadai.

VII. DAFTAR SIMBOL

A = luas penampang, inch^2
C_d = koefisien discharge (diambil = 0.865)
C_v = panas jenis gas pada volume tetap (BTU/lbm - ^oR)
C_p = Panas jenis gas pada tekanan tetap (BTU/lbm - ^oR)
D = diameter pipa, inch
f = faktor gesekan
f_a = faktor gesekan yang sesungguhnya,
g = percepatan gravitasi, ft/detik^2
HP = daya kuda (horse power) kompresor
L = panjang pipa salur, ft
M_g = berat molekul gas
N = jumlah total node
n = perbandingan panas jenis gas (C_p/C_v)
p = tekanan, psia
P_c = tekanan kritis, psia
P_r = tekanan reduced
P_1 = tekanan masuk (kompresor, hambatan), psia
P_2 = tekanan keluar (kompresor, hambatan), psia
Q_{sc} = laju alir volumetric gas (pada standard condition) ft^3/detik
R = konstanta gas
T = suhu, ^oF
T_r = suhu reduced
V = kecepatan gas, ft/detik
W = laju alir massa gas didalam pipa, lb/detik
Z = faktor kompresibilitas gas
$\overline{Z}$ = faktor kompresibilitas gas rata-rata (suction dan discharge kompresor)

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

Tabel 1
Data masukan contoh : 1

Jumlah Total Node	: 22
Jumlah Total Leg	: 20
Jumlah Total Kompresor	: 1
Epsilon (maks error)	: 0.001
Harga threshold betha	: 0.001

Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Suhu ºF
1	-	5,1	0,0	85
2	-	6,2	0,0	85
3	-	0,0	0,0	85
5	-	12,1	0,0	85
6	-	0,0	0,0	85
7	-	0,0	0,0	85
8	-	5,0	0,0	85
9	-	6,1	0,0	85
10	-	11,5	0,0	85
11	-	0,0	0,0	85
12	-	12,2	0,0	85
13	300,0	0,0	0,0	85
14	-	0,0	0,0	65
15	-	0,0	0,0	85
16	-	12,5	0,0	85
17	-	12,4	0,0	85
18	-	0,0	100,0	60
19	-	-25,0	100,0	60
20	-	0,0	100,0	60
21	1200,0	0,0	100,0	60
22	1200,0	0,0	100,0	60

Leg	Aliran Dari	Aliran Ke	Diameter inch	Panjang feet	Kekasaran inch	Efisiensi %	MWg
1	1	3	12,0	5000,0	0,000757	100	17,0
2	2	3	12,0	5500,0	0,000757	100	21,3
3	7	8	12,0	5800,0	0,000757	100	20,0
4	7	9	12,0	7000,0	0,000757	100	19,0
5	3	7	12,0	5600,0	0,000757	100	19,45
6	4	6	12,0	6000,0	0,000757	100	17,2
7	6	5	12,0	4000,0	0,000757	100	18,0
8	3	6	12,0	7000,0	0,000757	100	17,71
9	5	11	18,0	40000,0	0,000757	100	18,6
10	10	11	12,0	5000,0	0,000757	100	19,3
11	11	13	18,0	5000,0	0,000757	100	18,75
12	12	13	12,0	7600,0	0,000757	100	21,0
13	15	13	12,0	50000,0	0,000757	100	17,0
14	16	15	12,0	5000,0	0,000757	100	18,0
15	17	15	12,0	2500,0	0,000757	100	18,2
16	14	18	24,0	80000,0	0,000757	100	18,87
17	18	19	24,0	250000,0	0,000757	100	18,87
18	18	20	24,0	200000,0	0,000757	100	18,87
19	20	22	24,0	200000,0	0,000757	100	18,87
20	21	20	24,0	200000,0	0,000757	100	18,87

Tabel 2
Hasil perhitungan contoh : 1

Hasil Perhitungan

Tanggal : 6-6-2008 Waktu : 11 : 59 : 29
Jumlah iterasi : 1799
Total Error (MMSCFD) : 0.000992
Waktu Eksekusi (detik) : 322

Node	Tekanan psia	Laju alir MMSCFD	Elevasi feet	Suhu oF	Error MMSCFD	Catatan
1	311,52884	5,10000	0,00	85,0	-0,000132	-
2	311,60957	6,20000	0,00	85,0	-0,000086	-
4	309,43276	7,10000	0,00	85,0	-0,000060	-
5	307,02490	12,40000	0,00	85,0	-0,000016	-
6	309,22277	0,00000	0,00	85,0	-0,000060	-
7	311,93195	0,00000	0,00	85,0	-0,000106	-
8	312,04883	5,00000	0,00	85,0	-0,000107	-
9	312,12890	6,10000	0,00	85,0	-0,000077	-
10	301,67414	11,50000	0,00	85,0	-0,000004	-
11	301,18642	0,00000	0,00	85,0	-0,000008	-
12	300,88832	12,20000	0,00	85,0	0,000000	-
13	300,00000	0,00000	0,00	85,0	0,000000	INLET COMP 1
14	1209,41131	0,00000	0,00	65,0	0,000000	OUTLET COMP 1
15	318,79430	0,00000	0,00	85,0	-0,000082	-
16	319,30418	12,50000	0,00	85,0	-0,000041	-
17	319,04768	12,40000	0,00	85,0	-0,000083	-
18	1203,59568	0,00000	100,00	60,0	0,000000	-
19	1202,92926	-25,00000	100,00	60,0	0,000000	-
20	1200,76421	0,00000	100,00	60,0	0,000000	-
21	1200,00000	-30,25000	100,00	60,0	0,000000	-
22	1201,00000	-30,25000	100,00	60,0	0,000000	-

Leg	Aliran Ke	Dari	Laju alir MMSCF	Pres drop psia	Kecepatan feet/detik	Faktor gesekan
1	3	1	5,10006	-0,09294	75,15740	0,01436399
2	3	2	6,20004	-0,17367	91,36732	0,01348463
3	8	7	5,00011	0,11687	73,68442	0,01400602
4	9	7	6,10008	0,19694	89,89421	0,01375731
5	7	3	11,10019	0,49605	163,57875	0,01279344
6	6	4	7,10003	-0,20999	104,63005	0,01370561
7	6	5	29,5007	2,19787	434,73571	0,01190298
8	6	3	22,40038	-2,21314	330,10478	0,01214843
9	11	5	41,90047	-5,83848	274,43076	0,01139621
10	11	10	11,50000	-0,48772	169,47057	0,01275858
11	11	13	53,40048	1,18642	349,75107	0,01118494
12	12	13	12,20000	0,88832	179,78614	0,01255758
13	15	13	24,90012	18,79430	366,94264	0,01209857
14	16	15	12,50004	0,50988	184,20772	0,01276505
15	17	15	12,40008	0,25337	182,73467	0,01275785
16	18	14	85,50000	-5,81563	314,99416	0,01083672
17	19	18	25,00000	-0,66643	92,10356	0,01232162
18	20	18	60,50000	-2,83148	222,89060	0,01116148
19	22	20	30,25000	-0,76421	111,44530	0,01202742
20	21	20	30,25000	-0,76421	111,44530	0,01202742

Leg	Diameter inch	Panjang feet	Kekasaran inch	Eff %	MWg
1	12,000	5000,0	0,000757	100,0	17,00
2	12,000	5500,0	0,000757	100,0	21,30
3	12,000	5800,0	0,000757	100,0	20,00
4	12,000	7000,0	0,000757	100,0	19,00
5	12,000	5600,0	0,000757	100,0	19,45
6	12,000	6000,0	0,000757	100,0	17,20
7	12,000	4000,0	0,000757	100,0	18,00
8	12,000	7000,0	0,000757	100,0	17,71
9	18,000	40000,0	0,000757	100,0	18,60
10	12,000	5000,0	0,000757	100,0	19,30
11	18,000	5000,0	0,000757	100,0	18,75
12	12,000	7600,0	0,000757	100,0	21,00
13	12,000	50000,0	0,000757	100,0	17,00
14	12,000	5000,0	0,000757	100,0	18,00
15	12,000	2500,0	0,000757	100,0	18,20
16	24,000	80000,0	0,000757	100,0	18,87
17	24,000	250000,0	0,000757	100,0	18,87
18	24,000	200000,0	0,000757	100,0	18,87
19	24,000	200000,0	0,000757	100,0	18,87
20	24,000	200000,0	0,000757	100,0	18,87

Comp	Tek inlet psia	Tek outlet psia	Laju air MMSCFD	Comp ratio	Horseppower HP	Cpv	Eff %
1	300,0000	1209,4113	85,5000	4,0314	6471,3130	1,333	90,00

LEMBARAN PUBLIKASI LEMIGAS
VOL. 42. NO. 3, DESEMBER 2008: 50 - 60

α = sudut kemiringan pipa
β = faktor percepatan
ε = toleransi
μ = viskositas gas, cp
η_{pipa} = faktor effisiensi 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. Edward ML Tobing., "Pengembangan Model Pipa Salur Gas Dengan Menggunakan Model Algoritma Sederhana", Lembaran Publikasi Lemigas, Vol 41 No.3/2007, PPPTMGB "LEMIGAS".
4. Ahmed, T., "Hydrocarbon Phase Behavior", Gulf Pub.Co. Houston Texas, 1989
5. Beggs, H.D., Gas Production Operation", OGCI Publications, Tulsa Oklahoma, 1984.
6. Berar, G.P. and Eliason, B.G., "An Improve Gas Transmission Sistem Simulator", SPE Journal, December 1978, pp 389-398.
7. Ikoku, C.U., "Natural Gas Production Engineering", John Wiley & Son Inc., New York, 1984.
8. Szilas, A.P., "Production and Transportation of Oil and Gas – Part B : Gathering and Transportation", 2nd Completely Rev. Ed.,Elsevier, New York, 1986.
9. Stoner, MA, "Sensivity Analysis Applied to Steady State Model of Natural Gas Transportation System", SPE Journal.