

## **BAB VII**

### **SISTEM DAN JARINGAN PIPA**

#### **Tujuan Intruksional Umum (TIU)**

Mahasiswa diharapkan dapat merencanakan suatu bangunan air berdasarkan konsep mekanika fluida, teori hidrostatisa dan hidrodinamika.

#### **Tujuan Intruksional Khusus (TIK)**

1. Mahasiswa dapat menjelaskan sistem pipa dengan turbin dan pompa
2. Mahasiswa dapat menjelaskan prinsip sistem pipa seri, pipa ekivalen, pipa paralel dan pipa bercabang
3. Mahasiswa dapat menghitung besarnya debit dan kehilangan energi pada sistem dan jaringan pipa
4. Mahasiswa dapat merencanakan sistem dan jaringan pipa

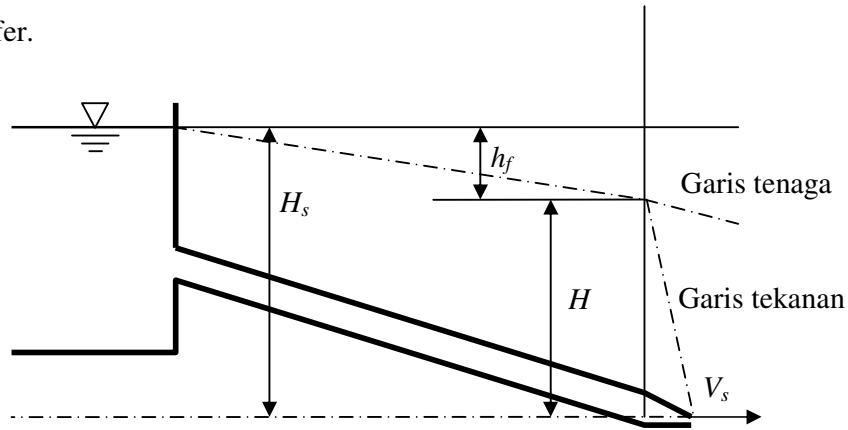
#### **7.1. Pendahuluan**

Sistem perpipaan berfungsi untuk mengalirkan zat cair dari satu tempat ke tempat yang lain. Aliran terjadi karena adanya perbedaan tinggi tekanan di kedua tempat, yang bisa terjadi karena adanya perbedaan elevasi muka air atau karena adanya pompa. Beberapa contoh sistem perpipaan adalah pengaliran minyak antar kota/daerah (misalnya angkutan minyak pertamina dari Cilacap ke Yogyakarta), pipa pembawa dan pipa pesat dari waduk ke turbin pembangkit listrik tenaga air, jaringan air minum diperkotaan, dan sebagainya.

#### **7.2 Pipa Dengan Turbin**

Di dalam pembangkit tenaga listrik, tenaga air digunakan untuk memutar turbin. Untuk mendapatkan kecepatan yang besar guna memutar turbin, pada ujung pipa diberi curat. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.1 dengan

menganggap kehilangan tenaga sekunder kecil maka disepanjang pipa garis tenaga berimpit dengan garis tekanan. Garis tenaga turun secara teratur (perlahan-lahan), karena adanya kehilangan tenaga akibat gesekan. Di bagian curat, garis tenaga turun dengan tajam menuju ujung hilir curat dimana tekanan adalah atmosfer.



Gambar 7.1 Pipa dengan curat

Dengan menganggap kehilangan tenaga sekunder diabaikan, tinggi tekanan efektif  $H$  adalah sama dengan tinggi statis  $H_s$  dikurangi kehilangan tenaga akibat gesekan  $h_f$ .

$$H = H_s - h_f$$

Kehilangan tenaga  $h_f$  diberikan oleh persamaan Darcy-Weisbach :

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5}$$

Mengingat  $V = Q/A = Q / \frac{1}{4} \pi D^2$

Dengan demikian tinggi tekanan efektif adalah :

$$H = H_s - \frac{8fLQ^2}{g\pi^2 D^5} \quad (7.1)$$

Daya yang tersedia pada curat :

$$D = Q H \gamma (\text{kgf m/dtk}) \quad (7.2)$$

Dengan:

$$Q = \text{debit aliran (m}^3/\text{dtk)}$$

$$H = \text{tinggi tekanan efektif (m)}$$

$$\gamma = \text{berat jenis zat cair (kgf/m}^3\text{)}$$

Apabila dikehendaki satuan dalam hp (*horse power*, daya kuda) maka:

$$D = \frac{Q H \gamma}{75} (\text{hp}) \quad (7.3)$$

Apabila efisiensi turbin adalah  $\eta$  maka daya yang diberikan oleh turbin adalah:

$$D = \frac{Q H \gamma \eta}{75} (\text{hp}) \quad (7.4)$$

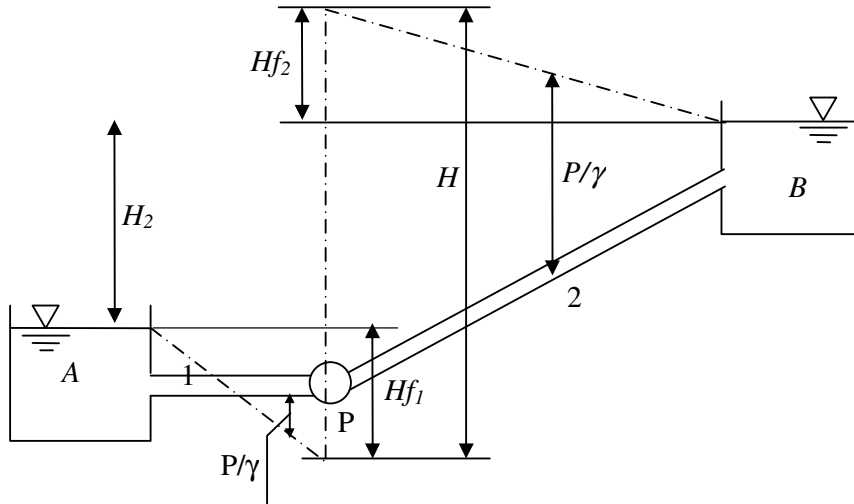
Substitusi dari persamaan (7.1) ke dalam persamaan (7.4) maka :

$$D = \frac{Q \gamma \eta}{75} \left( H_s - \frac{8 f L Q^2}{g \pi^2 D^5} \right) \quad (7.5)$$

### 7.3. Pipa Dengan Pompa

Jika pompa menaikkan zat cair dari kolam satu ke kolam lain dengan selisih elevasi muka air  $H_2$  seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.2 maka daya yang digunakan oleh pompa untuk menaikkan zat cair setinggi  $H_s$  adalah sama dengan tinggi  $H_2$  ditambah dengan kehilangan tenaga selama pengaliran dalam pipa tersebut. Kehilangan tenaga adalah ekuivalen dengan penambahan tinggi elevasi, sehingga efeknya sama dengan jika pompa menaikkan zat cair setinggi  $H = H_2 +$

$\Sigma h_f$ . Dalam gambar tersebut tinggi kecepatan diabaikan sehingga garis tenaga berimpit dengan garis tekanan.



Gambar 7.2. Pipa dengan pompa

Kehilangan tenaga terjadi pada pengaliran pipa 1 dan 2 yaitu sebesar  $h_{f1}$  dan  $h_{f2}$ . Pada pipa 1 yang merupakan pipa isap, garis tenaga (dan tekanan) menurun sampai dibawah pipa. Bagian pipa dimana garis tekanan di bawah sumbu pipa mempunyai tekanan negatif. Sedang pipa 2 merupakan pipa tekan.

Daya yang diperlukan pompa untuk menaikkan zat cair :

$$D = \frac{QH\gamma}{\eta} \text{ (kgf m/dtk)} \quad (7.6)$$

atau

$$D = \frac{QH\gamma}{75\eta} \text{ (hp)} \quad (7.7)$$

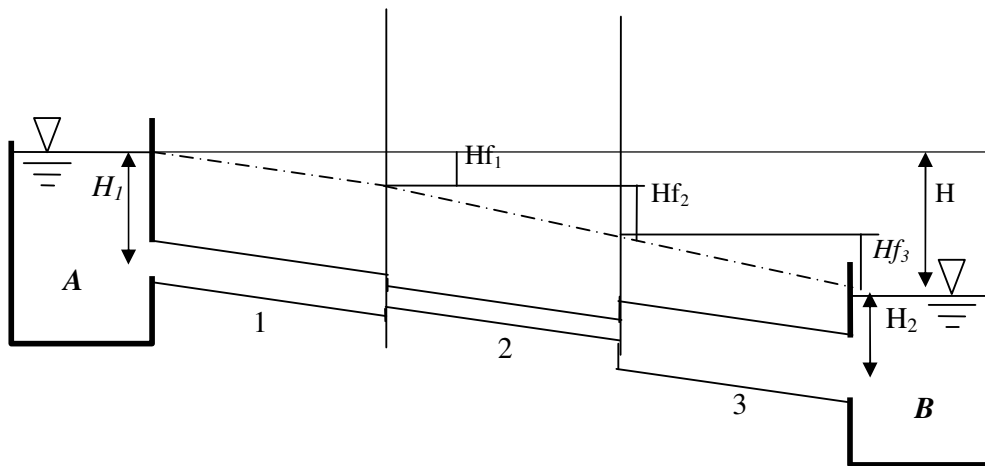
dengan  $\eta$  adalah efisiensi pompa. Pada pemakaian pompa, efisiensi pompa digunakan sebagai pembagi dalam rumus daya pompa

#### 7.4. Pipa Hubungan Seri

Apabila suatu saluran pipa terdiri dari pipa-pipa dengan ukuran yang berbeda, pipa tersebut adalah dalam hubungan seri. Gambar 7.3 menunjukkan suatu sistem tiga pipa dengan karakteristik berbeda yang dihubungkan secara seri. Panjang, diameter, dan koefisien gesekan masing-masing pipa adalah  $L_1, L_2, L_3$ ;  $D_1, D_2, D_3$ ; dan  $f_1, f_2, f_3$ .

Jika beda tinggi muka air kedua kolam diketahui, akan dicari besar debit aliran  $Q$  dengan menggunakan persamaan kontinuitas dan energi (Bernoulli). Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menggambarkan garis tenaga. Seperti terlihat dalam Gambar 7.3 garis tenaga akan menurun ke arah aliran. Kehilangan tenaga pada masing-masing pipa adalah  $h_{f1}, h_{f2}$ , dan  $h_{f3}$ . Dianggap bahwa kehilangan tenaga sekunder cukup kecil sehingga diabaikan.

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad (7.8)$$



Gambar 7.3. Pipa dalam hubungan seri

Dengan menggunakan persamaan Bernoulli untuk titik 1 dan 2 (pada garis aliran) adalah :

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$

Pada kedua titik tinggi tekanan adalah  $H_1$  dan  $H_2$ , dan kecepatan  $V_1 = V_2 = 0$  (tampang aliran sangat besar) sehingga persamaan di atas menjadi :

$$z_1 + H_1 = z_2 + H_2 + h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$

$$(z_1 + H_1) - (z_2 + H_2) = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$

atau

$$H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3} \quad (7.9)$$

Dengan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach, persamaan (7.9) menjadi :

$$H = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \quad (7.10)$$

Untuk masing-masing pipa, kecepatan aliran adalah :

$$V_1 = Q / (\frac{1}{4} \pi D_1^2) ; V_2 = Q / (\frac{1}{4} \pi D_2^2) ; V_3 = Q / (\frac{1}{4} \pi D_3^2)$$

Substitusi nilai  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $V_3$  ke dalam persamaan (7.10) maka akan di dapat:

$$H = \frac{8Q^2}{g \pi^2} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right) \quad (7.11)$$

Debit aliran adalah:

$$Q = \frac{\pi \sqrt{2gH}}{4 \left( f_1 L_1 / D_1^5 + f_2 L_2 / D_2^5 + f_3 L_3 / D_3^5 \right)^{1/2}} \quad (7.12)$$

Kadang-kadang penyelesaian pipa seri dilakukan dengan suatu pipa ekuivalen yang mempunyai penampang seragam. Pipa disebut ekuivalen apabila kehilangan tekanan pada pengaliran di dalam pipa ekuivalen sama dengan pipa-pipa yang

diganti. Sejumlah pipa dengan bermacam-macam nilai  $f$ ,  $L$ , dan  $D$  akan dijadikan menjadi satu pipa ekuivalen. Untuk itu diambil diameter  $D$  dan koefisien gesekan  $f_e$  dari pipa yang terpanjang (atau yang telah ditentukan) dan kemudian ditentukan panjang pipa ekuivalen. Kehilangan tenaga dalam pipa ekuivalen :

$$H = \frac{8Q^2}{g \pi^2} \left( \frac{f_e L_e}{D_e^5} \right) \quad (7.13)$$

$$L_e = \frac{D_e^5}{f_e} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right) \quad (7.14)$$

### 7.5. Pipa Hubungan Pararel

Pada keadaan dimana aliran melalui dua atau lebih pipa dihubungkan secara pararel seperti dalam Gambar 7.4 maka persamaan kontinuitas adalah :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7.15)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

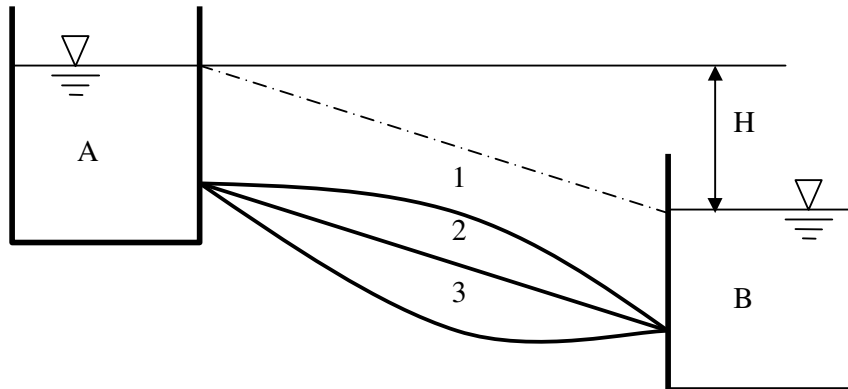
$$Q = \frac{1}{4} \pi (D_1^2 V_1 + D_2^2 V_2 + D_3^2 V_3) \quad (7.16)$$

Persamaan energi :

$$H = h_{f1} = h_{f2} = h_{f3} \quad (7.17)$$

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

$$H = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} = f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \quad (7.18)$$



Gambar 7.4. Pipa hubungan paralel

Panjang pipa ekuivalen ditentukan dengan cara yang sama seperti pada hubungan seri. Dari persamaan (7.16) di dapat :

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} \left( \frac{D_e^5}{f_e L_e} \right)^{1/2} H^{1/2}$$

Dengan cara seperti di atas :

$$Q_1 = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} \left( \frac{D_1^5}{f_1 L_1} \right)^{1/2} H^{1/2}$$

$$Q_2 = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} \left( \frac{D_2^5}{f_2 L_2} \right)^{1/2} H^{1/2}$$

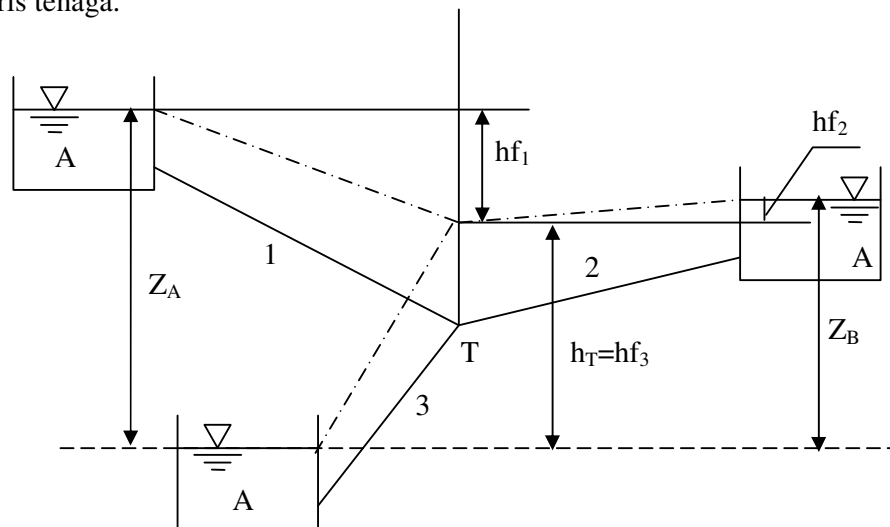
$$Q_3 = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g} \left( \frac{D_3^5}{f_3 L_3} \right)^{1/2} H^{1/2}$$

Substitusi persamaan tersebut ke dalam persamaan (7.15) maka akan di dapat :

$$\left[ \frac{D_e^5}{f_e L_e} \right]^{1/2} = \left[ \frac{D_1^5}{f_1 L_1} \right]^{1/2} + \left[ \frac{D_2^5}{f_2 L_2} \right]^{1/2} + \left[ \frac{D_3^5}{f_3 L_3} \right]^{1/2} \quad (7.19)$$

## 7.6. Pipa Bercabang

Sering suatu pipa menghubungkan tiga atau lebih kolam. Gambar 7.5 menunjukkan suatu sistem pompa bercabang yang menguhungkan tiga buah kolam. Akan di cari debit aliran melalui tiap-tiap pipa yang menghubungkan ketiga kolam tersebut apabila panjang, diameter,macam pipa (kekasaran  $k$ ), diberikan dan rapat massa serta kekentalan zat cair diketahui. Garis tekanan akan berada pada muka air di tiap-tiap kolam, dan akan bertemu pada satu titik di atas titik cabang T. Debit aliran melalui tiap pipa ditentukan oleh kemiringan garis tekanan masing-masing. Arah aliran sama dengan arah kemiringan (penurunan) garis tenaga.



Gambar 7.5. Pipa mengubungkan tiga kolam

Persamaan kontinuitas pada titik cabang, yaitu aliran menuju titik cabang T harus sama dengan yang meninggalkan T. Pada gambar tersebut terlihat bahwa aliran akan keluar dari kolam A dan masuk ke kolam C. Aliran keluar atau masuk

ke dalam kolam B tergantung pada sifat pipa 1 dan 2 serta elevasi muka air kolam A, B, dan C. Persamaan kontinuitas adalah salah satu dari kedua bentuk berikut:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (7.20)$$

atau

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (7.21)$$

Yang tergantung apakah elevasi garis tekanan di titik cabang lebih besar atau lebih kecil dari pada elevasi muka air kolam B. Persamaan (7.20) berlaku apabila elevasi garis tekanan di T lebih tinggi dari elevasi muka air kolam B, dan apabila sebaliknya berlaku persamaan (7.21). Prosedur hitungan adalah sebagai berikut :

1. Anggap garis tekanan di titik T mempunyai elevasi  $h_T$ .
2. Hitung  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  untuk keadaan tersebut.
3. Jika persamaan kontinuitas dipenuhi, maka nilai  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  adalah benar.
4. Jika aliran menuju T tidak sama dengan aliran meninggalkan T, di buat anggapan baru elevasi garis tekanan di T, yaitu dengan menaikkan garis tekanan di T apabila aliran masuk lebih besar daripada aliran keluar dan menurunkannya apabila aliran masuk lebih kecil dari aliran keluar.
5. Ulangi prosedur tersebut sampai dipenuhinya persamaan kontinuitas.

Pada keadaan seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 7.5 dengan menganggap bahwa elevasi muka air kolam C sebagai bidang referensi dan dianggap bahwa elevasi garis tekanan di T di bawah elevasi muka air kolam B ( $h_T < z_B$ ) maka persamaan aliran mempunyai hubungan sebagai berikut ini.

Persamaan energi :

$$z_A - h_T = h_{f1} = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} \quad (7.22)$$

$$z_B - h_T = h_{f2} = f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} \quad (7.23)$$

$$h_T = h_{f3} = f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g} \quad (7.24)$$

Persamaan kontinuitas :

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 \quad (7.25)$$

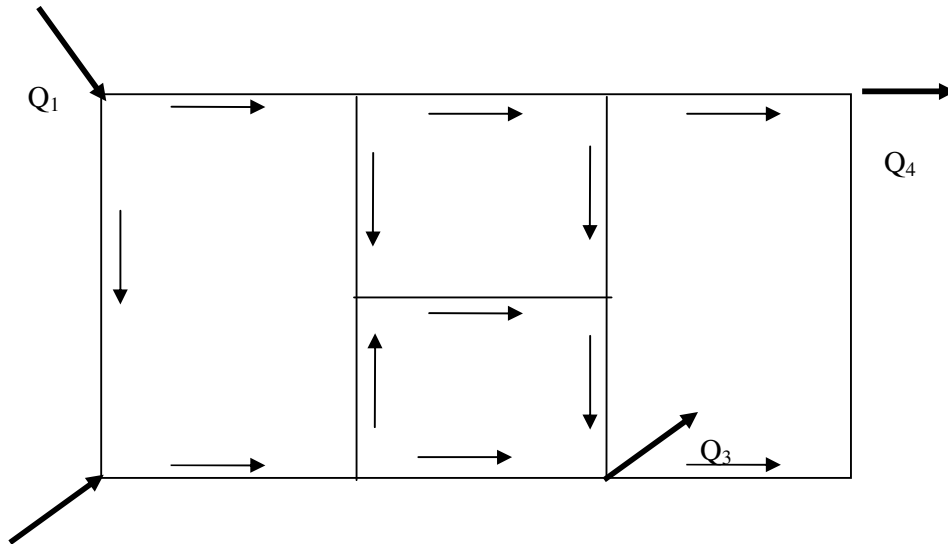
Dari persamaan di atas, jika  $z_A$ ,  $z_B$ , dan sifat-sifat pipa diketahui maka  $h_T$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ , dan  $Q_3$  dapat dihitu

### 7.7. Jaringan Pipa

Pemakaian jaringan pipa dalam bidang teknik sipil terdapat pada sistem jaringan distribusi air minum. Sistem jaringan ini merupakan bagian yang paling mahal dari suatu perusahaan air minum. Oleh karena itu harus dibuat perencanaan yang teliti untuk mendapatkan sistem distribusi yang efisien. Jumlah atau debit air yang disediakan tergantung pada jumlah penduduk dan macam industri yang dilayani.

Analisis jaringan pipa ini cukup rumit dan memerlukan perhitungan yang besar, oleh karena itu pemakaian komputer untuk analisis ini akan mengurangi kesulitan. Untuk jaringan kecil, pemakaian kalkulator untuk hitungan masih dilakukan. Ada beberapa metode untuk menyelesaikan perhitungan sistem jaringan pipa, diantaranya adalah metode Hardy Cross dan metode matriks.

Dalam buku ini hanya akan dibahas metode Hardy Cross. Gambar 7.6 adalah contoh suatu sistem jaringan pipa.



Gambar 7.6. Contoh suatu sistem jaringan pipa

Aliran keluar dari sistem biasanya dianggap terjadi pada titik-titik simpul. Metode Hardy Cross ini dilakukan secara iteratif. Pada awal hitungan ditetapkan debit aliran melalui masing-masing pipa secara sembarang. Kemudian dihitung debit aliran di semua pipa berdasarkan nilai awal tersebut. Prosedur hitungan diulangi lagi sampai persamaan kontinuitas di setiap titik simpul dipenuhi.

Pada jaringan pipa harus dipenuhi persamaan kontinuitas dan tenaga yaitu :

1. Aliran di dalam pipa harus memenuhi hukum-hukum gesekan pipa untuk aliran dalam pipa tunggal.

$$h_f = \frac{8 f L}{g \pi^2 D^5} Q^2$$

2. Aliran masuk ke dalam tiap-tiap simpul harus sama dengan aliran yang keluar.

$$\sum Q_i = 0 \quad (7.26)$$

3. Jumlah aljabar dari kehilangan tenaga dalam satu jaringan tertutup harus sama dengan nol.

$$\sum h_f = 0 \quad (7.27)$$

### 7.8. Rumus Kehilangan Tenaga Akibat Gesekan

Setiap pipa dari sistem jaringan terdapat hubungan antara kehilangan tenaga dan debit. Secara umum hubungan tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$h_f = k Q_m \quad (7.28)$$

Dengan  $m$  tergantung pada rumus gesekan pipa yang digunakan, dan koefisien  $k$  tergantung pada rumus gesekan pipa dan karakteristik pipa. Sebenarnya nilai pangkat  $m$  tidak selalu konstan, kecuali bila pengaliran berada pada keadaan hidraulis kasar, yang sedapat mungkin dihindari. Akan tetapi karena perbedaan kecepatan pada masing-masing pipa tidak besar, maka biasanya nilai  $m$  di anggap konstan untuk semua pipa. Sebagai contoh untuk rumus Darcy-Weisbach.

$$h_f = k Q^2 \quad (7.29)$$

Dengan:

$$h = \frac{8 f L}{g \pi^2 D^5} \quad (7.30)$$

### 7.9. Metode Hardy Cross

Dianggap bahwa karakteristik pipa dan aliran yang masuk dan meninggalkan jaringan pipa diketahui dan akan dihitung debit pada setiap elemen dari jaringan tersebut. Jika tekanan pada seluruh jaringan juga dihitung, maka

tinggi tekanan pada satu titik harus diketahui. Prosedur perhitungan dengan metode Hardy Cross adalah sebagai berikut :

1. Pilih pembagian debit melalui tiap-tiap pipa  $Q_0$  hingga terpenuhi syarat kontinuitas.
2. Hitung kehilangan tenaga pada tiap pipa dengan rumus  $h_f = k Q^2$ .
3. Jaringan pipa dibagi menjadi sejumlah jaring tertutup sedemikian sehingga tiap pipa termasuk dalam paling sedikit satu jaring.
4. Hitung jumlah kerugian tinggi tenaga sekeliling tiap-tiap jaring, yaitu  $\sum h_f = 0$ .
5. Hitung nilai  $\sum |2kQ|$  untuk tiap jaring.
6. Pada tiap jarring diadakan koreksi debit  $\Delta Q$  supaya kehilangan tinggi tenaga dalam jarring seimbang. Adapun koreksinya adalah :

$$\Delta Q = \frac{\sum k Q_0^2}{\sum |2k Q_0|} \quad (7.31)$$

7. Dengan debit yang telah dikoreksi sebesar  $Q = Q_0 + \Delta Q$ , prosedur dari no.1 sampai no.6 diulangi hingga akhir  $\Delta Q \approx 0$ , dengan  $Q$  adalah debit sebenarnya,  $Q_0$  adalah debit dimisalkan, dan  $\Delta Q$  adalah debit koreksi.

Penurunan rumus (7.31) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} h_f &= k Q^2 = k (Q_0 + \Delta Q)^2 \\ &= k Q_0^2 + 2k Q_0 \Delta Q + k \Delta Q^2 \end{aligned}$$

Untuk  $\Delta Q \ll Q_0$  maka  $\Delta Q^2 \approx 0$  sehingga :

$$h_f = k Q_0^2 + 2k Q_0 \Delta Q$$

Jumlah kehilangan tenaga dalam tiap jaringan adalah nol :

$$\sum h_f = 0$$

$$\sum h_f = \sum k Q_0^2 = \Delta Q \sum 2kQ_0 = 0$$

$$\Delta Q = \frac{\sum k Q^2}{\sum |2k Q_0|}$$

Untuk jaringan pipa yang cukup besar hitungan dilakukan dengan komputer, tetapi untuk jaringan kecil/ sederhana dapat menggunakan kalkulator.

Hitungan jaringan pipa sederhana dilakukan dengan membuat tabel untuk setiap jaring. Dalam setiap jaring tersebut jumlah aljabar kehilangan tenaga adalah nol, dengan catatan aliran searah jarum jam (ditinjau dari pusat jaringan) diberi tanda positif, sedang yang berlawanan bertanda negatif. Untuk memudahkan hitungan, dalam tiap jaringan selalu dimulai dengan aliran yang searah jarum jam. Koreksi debit  $\Delta Q$  dihitung dengan rumus (7.31). Arah koreksi harus disesuaikan dengan arah aliran. Apabila dalam satu jaring kehilangan tenaga karena aliran searah jarum jam lebih besar dari yang berlawanan ( $\sum k Q_0^2 > 0$ ) maka arah koreksi debit adalah berlawanan jarum jam (negatif). Jika suatu pipa menyusun dua jaring, maka koreksi debit  $\Delta Q$  untuk pipa tersebut terdiri dari dua buah  $\Delta Q$  yang diperoleh dari dua jaring tersebut. Hasil hitungan yang benar di capai apabila  $\Delta Q \approx 0$ .

### 7.10. Pelatihan

1) Kolam A dan B dengan beda tinggi muka air 25 m (kolam A lebih tinggi dari kolam B) dihubungkan oleh serangkaian pipa 1, 2, dan 3 yang dihubungkan secara seri. Pipa 1 ( $D_1 = 30''$ ,  $L_1 = 600$  m,  $f_1 = 0,016$ ), pipa 2 ( $D_2 = 20''$ ,  $L_2 = 400$  m,  $f_2 = 0,014$ ), dan pipa 3 ( $D_3 = 24''$ ,  $L_3 = 450$  m,  $f_3 = 0,18$ ). Kehilangan tinggi tenaga sekunder diabaikan.

- Tentukan debit pipa
- Tentukan tekanan pada titik-titik sambung pipa jika jarak antara muka air pada kedua kolam dan sumbu pipa 10 m (rangkaian pipa dianggap lurus)
- Tentukan panjang pipa ekuivalen (terhadap pipa terpanjang)

#### Penyelesaian

Karakteristik pipa :

$$L_1 = 600 \text{ m} \quad D_1 = 30'' \quad f_1 = 0,016$$

$$L_2 = 400 \text{ m} \quad D_2 = 20'' \quad f_2 = 0,014$$

$$L_3 = 450 \text{ m} \quad D_3 = 24'' \quad f_3 = 0,18$$

a. Mencari debit aliran

Persamaan tenaga

$$H = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3} = \frac{8 f_1 L_1 Q^2}{g \pi^2 D_1^5} + \frac{8 f_2 L_2 Q^2}{g \pi^2 D_2^5} + \frac{8 f_3 L_3 Q^2}{g \pi^2 D_3^5}$$
$$25 = \frac{8 \times 0,016 \times 600}{9,81 \times \pi^2 \times 0,762^5} Q_1^2 + \frac{8 \times 0,014 \times 400}{9,81 \times \pi^2 \times 0,508^5} Q_2^2 + \frac{8 \times 0,18 \times 450}{9,81 \times \pi^2 \times 0,6096^5} Q_3^2$$

Dengan persamaan kontinuitas  $Q = Q_1 = Q_2 = Q_3$  maka persamaan diatas menjadi :

$$25 = 3,088 Q^2 + 13,677 Q^2 + 7,95 Q^2$$

$$25 = 24,715 Q^2$$

$$Q = 1,006 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

b. tekanan pada titik sambung

Tekanan di titik C dan E dapat dihitung berdasarkan tinggi tekanan di titik C dan E (jarak vertikal dari kedua titik tersebut terhadap garis tekanan).

Sebagai contoh tinggi tekanan di titik C adalah :

$$\frac{P_c}{\gamma} = 10 + x - h_{f1}$$

Dengan x adalah jarak vertikal dari titik C ke sambungan kolam dan ujung hulu pipa 1.

Jarak vertikal dari titik C dan E sampai garis horisontal melalui ujung hulu sambung pipa 1 :

$$x = \frac{L_1}{(L_1 + L_2 + L_3)} H = \frac{600}{1450} (25) = 10,345 \text{ m}$$

$$y = \frac{L_1 + L_2}{(L_1 + L_2 + L_3)} H = \frac{1000}{1450} (25) = 17,241 \text{ m}$$

$$h_{f1} = \frac{8 f_1 L_1}{g \pi^2 D_1^5} Q_1^2 = 3,088 \times (1,006)^2 = 3,125 \text{ m}$$

$$h_{f2} = \frac{8 f_2 L_2}{g \pi^2 D_2^5} Q_2^2 = 13,677 \times (1,006)^2 = 13,842 \text{ m}$$

Tinggi tekanan di titik C :

$$\frac{P_c}{\gamma} = 10 + x - h_{f1} = 10 + 10,345 - 3,125 = 17,22 \text{ m}$$

$$P_c = 17,22 \gamma = 17,22 \text{ t/m}^2 = 17,22 \times (1000 / 10.000)$$

$$P_c = 1,722 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (MKS)}$$

atau

$$P_C = 17,22 \rho g = 17,22 \times 1000 \times 9,81 = 168.928 \text{ N/m}^2$$

$$P_C = 168,928 \text{ kN/m}^2 \text{ (SI)}$$

Tekanan di titik E :

$$\frac{P_E}{\gamma} = 10 + y - (h_{f1} + h_{f2}) = 10 + 17,241 - 16,967 = 10,274 \text{ m}$$

$$P_E = 10,274 \times 1 = 10,274 = \text{t/m}^2 = 1,0274 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (MKS)}$$

atau

$$P_E = 10,274 \times 1000 \times 9,81 = 100.788 \text{ N/m}^2 = 100,788 \text{ kN/m}^2 \text{ (SI)}$$

c. panjang pipa ekivalen

Panjang pipa ekivalen dihitung dengan persamaan:

$$L_e = \frac{D_e^5}{f_e} \left( \frac{f_1 L_1}{D_1^5} + \frac{f_2 L_2}{D_2^5} + \frac{f_3 L_3}{D_3^5} \right)$$

Nilai  $D_e$  dan  $f_e$  disamakan dengan nilai tersebut dari pipa 1, sehingga :

$$L_e = \frac{(0,762)^5}{0,016} \left( \frac{0,016 \times 600}{(0,762)^5} + \frac{0,014 \times 400}{(0,508)^5} + \frac{0,018 \times 450}{(0,6096)^5} \right) = 4802,76 \text{ m}$$

2). Air di pompa dari kolam A ke kolam B melalui pipa 1 ( $D_1 = 24''$ ,  $L_1 = 450 \text{ m}$ ) yang kemudian bercabang menjadi pipa 2 ( $D_2 = 12''$ ,  $L_2 = 600 \text{ m}$ ) dan pipa 3 ( $D_3 = 18''$ ,  $L_3 = 600 \text{ m}$ ). Pompa terletak pada kolam A dan muka air kolam B berada 60 m di atas air kolam A. Koefisien gesekan ( $f$ ) untuk semua pipa 0,02. Debit aliran 300 l/dtk.

- Tentukan panjang pipa ekivalen terhadap pipa 1
- Daya pompa dalam tenaga kuda (efisiensi pompa 75 %)
- Debit masing-masing pipa bercabang

Penyelesaian

Karakteristik pipa :

$$L_1 = 450 \text{ m} \quad D_1 = 24'' = 0,6096 \quad f_1 = 0,02$$

$$L_2 = 600 \text{ m} \quad D_2 = 12'' = 0,3048 \quad f_2 = 0,02$$

$$L_3 = 600 \text{ m} \quad D_3 = 18'' = 0,4572 \quad f_3 = 0,02$$

Rumus kehilangan tenaga karena gesekan :

$$h_f = \frac{8 f L}{g \pi^2 D^5} Q^2$$

atau

$$Q = \sqrt{\frac{h_f g \pi^2 D^5}{8 f L}}$$

a. Panjang ekuivalen untuk pipa paralel

Bagian pipa yang mempunyai hubungan paralel (pipa 2 dan pipa 3) di ganti oleh pipa ekuivalen terhadap pipa 1.

$$\left[ \frac{D_e^5}{f_e L_e} \right]^{1/2} = \left[ \frac{D_2^5}{f_2 L_2} \right]^{1/2} + \left[ \frac{D_3^5}{f_3 L_3} \right]^{1/2}$$

Dengan mengambil  $f_e = f_1$  dan  $D_e = D_1$ , maka :

$$\left[ \frac{(0,6096)^5}{0,02 \times L_e} \right]^{1/2} = \left[ \frac{(0,3048)^5}{0,02 \times 600} \right]^{1/2} + \left[ \frac{(0,4572)^5}{0,02 \times 600} \right]^{1/2}$$

$$\frac{2,0516}{\sqrt{L_e}} = 0,0148 + 0,0408$$

$$L_e = 1361,2 \text{ m}$$

$$L_e \text{ total} = L_1 + L_e = 1811,2 \text{ m}$$

b. Menghitung daya pompa

Hitungan didasarkan pada panjang pipa ekuivalen.

$$h_f = \frac{8 \times 0,02 \times 1811,2}{9,81 \times \pi^2 \times (0,6096)^5} (0,3)^2 = 3,2 \text{ m}$$

Tinggi tekanan efektif :

$$H = H_s + h_f = 60 + 3,2 = 63,2 \text{ m}$$

Daya pompa :

$$D = \frac{QH\gamma}{75\eta} = \frac{0,3 \times 63,2 \times 1000}{75 \times 0,75} = 337,1 \text{ hp}$$

c. Menghitung debit pompa di pipa 2 dan pipa 3

Dalam pertanyaan (a) telah dihitung panjang pipa ekuivalen yang menggantikan pipa paralel 2 dan 3. Debit aliran yang melalui pipa ekuivalen tersebut adalah  $Q = 300 \text{ l/dtk}$ . Kehilangan tenaga pada masing-masing pipa yang mempunyai hubungan paralel adalah sama.

$$h_{fe} = h_{f2} = h_{f3}$$

$$h_{fe} = \frac{8 f_e L_e}{g \pi^2 D_e^5} Q^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 1361,2}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,6096)^5} (0,3)^2 = 2,4049 \text{ m}$$

Untuk menghitung debit pipa 2 digunakan hubungan  $h_{f2} = h_{fe} = 2,4049 \text{ m}$

$$2,4049 = \frac{8 f_2 L_2}{g \pi^2 D_2^5} Q_2^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 600}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,3048)^5} Q_2^2$$

atau

$$Q_2 = 0,07988 \text{ m}^3/\text{dtk} = 79,88 \text{ l/dtk}$$

Menghitung debit pipa 3 yaitu  $h_{f3} = h_{fe} = 2,4049 \text{ m}$

$$2,4049 = \frac{8 f_3 L_3}{g \pi^2 D_3^5} Q_3^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 600}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,4572)^5} Q_3^2$$

di dapat

$$Q_3 = 0,22012 \text{ m}^3/\text{dtk} = 220,12 \text{ l/dtk}$$

Dalam pertanyaan (c) di atas, hitungan dilakukan berdasarkan pipa ekuivalen. Untuk menghitung debit aliran bisa juga menggunakan sistem pipa yang ada. Berikut ini diberikan cara hitungan tersebut.

Kehilangan tenaga sepanjang aliran :

$$\sum h_f = h_{f1} + h_{f2}$$

atau

$$\sum h_f = h_{f1} + h_{f3}$$

dengan menyamakan kedua persamaan tersebut di dapat :

$$h_{f2} = h_{f3}$$

$$\frac{8 f_2 L_2}{g \pi^2 D_2^5} Q_2^2 = \frac{8 f_3 L_3}{g \pi^2 D_3^5} Q_3^2$$

$$\frac{8 \times 0,02 \times 600}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,3048)^5} Q_2^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 600}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,4572)^5} Q_3^2$$

atau

$$Q_2 = 0,363 Q_3$$

Persamaan kontinuitas :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$0,3 = 0,363 Q_3 + Q_3$$

$$Q_3 = 0,2201 \text{ m}^3/\text{dtk} = 220,1 \text{ l/dtk}$$

Debit pipa 2 :

$$Q_2 = Q_1 - Q_3 = 300 - 220,1 = 79,9 \text{ l/dtk}$$

Daya pompa :

$$h_{f2} = \frac{8 f_2 L_2}{g \pi^2 D_2^5} Q_2^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 600}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,3048)^5} (0,07988)^2 = 2,4049 \text{ m}$$

$$h_{f1} = \frac{8 f_1 L_1}{g \pi^2 D_1^5} Q_1^2 = \frac{8 \times 0,02 \times 450}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,6096)^5} (0,3)^2 = 0,795 \text{ m}$$

$$\sum h_f = h_{f1} + h_{f2} = 2,4049 + 0,795 = 3,20 \text{ m}$$

$$H = h_s + \sum h_f = 60 + 3,2 = 63,2 \text{ m}$$

$$D = \frac{QH\gamma}{75\eta} = \frac{0,3 \times 63,2 \times 1000}{75 \times 0,75} = 337,1 \text{ hp}$$

3). Diketahui pipa bercabang (Gambar 11.9), ujung pipa D terbuka ke udara luar (tekanan atmosfer). Data pipa adalah  $L_1 = 2440 \text{ m}$ ,  $D_1 = 610 \text{ mm}$  ;  $L_2 = 1200 \text{ m}$ ,  $D_2 = 406 \text{ mm}$  ;  $L_3 = 1220 \text{ m}$ ,  $D_3 = 305 \text{ mm}$ . Nilai  $f$  semua pipa adalah sama yaitu 0,029. Hitung debit masing-masing pipa.

### Penyelesaian

$$z_A = \text{elevasi A} - \text{elevasi D} = 196,7 - 162,6 = 34,1 \text{ m}$$

$$z_B = \text{elevasi B} - \text{elevasi D} = 190,0 - 162,6 = 27,4 \text{ m}$$

Karena elevasi garis tekanan di C tidak diketahui (semua aliran tidak diketahui), maka penyelesaian dilakukan dengan cara coba-banding.

### *Pemisalan I*

Dianggap elevasi garis tekanan di C sama dengan elevasi muka air di B. Jadi aliran ke atau dari kolam B adalah nol.

$$h_{f2} = 0$$

$$\begin{aligned} h_C &= \text{elevasi garis tekanan di C} - \text{elevasi D} = z_B \\ &= 190,0 - 162,6 = 27,4 \text{ m} \end{aligned}$$

Kehilangan tenaga di pipa 1 :

$$h_{f1} = z_A - h_C = 34,1 - 27,4 = 6,7 \text{ m}$$

$$6,7 = \frac{8 f_1 L_1}{g \pi^2 D_1^5} Q_1^2 = \frac{8 \times 0,029 \times 2440}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,61)^5} Q_1^2 \rightarrow Q_1 = 0,311 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Kehilangan tenaga di pipa 2 :

$$h_{f2} = 0$$

atau

$$Q_2 = 0$$

Kehilangan tenaga di pipa 3 :

$$h_{f3} = h_C = 27,4 \text{ m}$$

$$27,4 = \frac{8 f_3 L_3}{g \pi^2 D_3^5} Q_3^2 = \frac{8 \times 0,029 \times 1220}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,305)^5} Q_3^2 \rightarrow Q_3 = 0,157 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Diselidiki persamaan kontinuitas :

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3) = 0,311 - (0 + 0,157) = 0,154 > 0$$

Jadi persamaan kontinuitas belum dipenuhi.

Hasil hitungan dengan pemisalan tersebut menunjukkan bahwa garis tekanan di C harus dinaikkan, sehingga akan mengurangi aliran dari A dan menaikkan aliran ke D dan dengan penambahan aliran ke B.

*Pemisalan II*

Elevasi garis tekanan di C adalah 193,0 m (pemisalan sembarang)

$$h_C = 193,0 - 162,6 = 30,4 \text{ m}$$

$$h_{f1} = 34,1 - 30,4 = 3,7 \text{ m}$$

$$Q_1 = \left[ \frac{h_{f1} g \pi^2 D_1^5}{8 f_1 L_1} \right]^{1/2} = \left[ \frac{3,7 \times 9,81 \times \pi^2 \times (0,61)^5}{8 \times 0,029 \times 2440} \right]^{1/2} = 0,231 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

$$h_{f2} = h_C - z_B = 30,4 - 27,4 = 3,0 \text{ m}$$

$$Q_2 = \left[ \frac{h_{f2} g \pi^2 D_2^5}{8 f_2 L_2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{3,0 \times 9,81 \times \pi^2 \times (0,406)^5}{8 \times 0,029 \times 1200} \right]^{1/2} = 0,107 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

$$h_{f3} = h_C = 30,4 \text{ m}$$

$$Q_3 = \left[ \frac{h_{f3} g \pi^2 D_3^5}{8 f_3 L_3} \right]^{1/2} = \left[ \frac{30,4 \times 9,81 \times \pi^2 \times (0,305)^5}{8 \times 0,029 \times 1220} \right]^{1/2} = 0,166 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Diselidiki persamaan kontinuitas :

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3) = 0,231 - (0,107 + 0,166) = - 0,042 < 0$$

Jadi persamaan kontinuitas belum dipenuhi.

### *Pemisalan III*

Pemisalan berikutnya dilakukan dengan cara interpolasi berdasarkan hasil hitungan pada pemisalan I dan II dengan menggunakan Gambar 7.5 yang merupakan hubungan antara  $Q_1$  (ordinat) dan  $Q_1 - (Q_2 + Q_3)$  (absis).

Berdasarkan hukum segitiga sebangun :

$$\frac{0,042}{0,154} = \frac{x}{(0,311 - 0,231 - x)} \rightarrow x = 0,017$$

Pemisalan berikutnya adalah :

$$Q_1 = 0,231 + x = 0,248$$

Dengan diketahui  $Q_1$  maka dapat dihitung  $h_{f1}$ .

$$h_{f1} = \frac{8 f_1 L_1}{g \pi^2 D_1^5} Q_1^2 = \frac{8 \times 0,029 \times 2440}{\pi^2 \times 9,81 \times (0,61)^5} (0,248)^2 = 4,26 \text{ m}$$

Elevasi garis tekanan di C =  $196,7 - 4,26 = 192,44$  m

$$h_C = 192,44 - 162,6 = 29,84 \text{ m}$$

$$h_{f2} = 29,84 - 27,4 = 2,44 \text{ m}$$

Debit pipa 2 :

$$Q_2 = \left[ \frac{h_{f2} g \pi^2 D_2^5}{8 f_2 L_2} \right]^{1/2} = \left[ \frac{2,44 \times 9,81 \times \pi^2 \times (0,406)^5}{8 \times 0,029 \times 1200} \right]^{1/2} = 0,097 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

$$h_{f3} = h_C = 29,84 \text{ m}$$

$$Q_3 = \left[ \frac{h_{f3} g \pi^2 D_3^5}{8 f_3 L_3} \right]^{1/2} = \left[ \frac{29,84 \times 9,81 \times \pi^2 \times (0,305)^5}{8 \times 0,029 \times 1220} \right]^{1/2} = 0,164 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Diselidiki persamaan kontinuitas :

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3) = 0,248 - (0,097 + 0,164) = -0,013 < 0$$

Jadi persamaan kontinuitas belum dipenuhi.

#### *Pemisalan IV*

Pemisalan berikutnya dilakukan dengan interpolasi seperti pada pemisalan

III, yaitu berdasarkan hasil hitungan pada pemisalan II dan III.

$$\frac{0,042 - 0,013}{0,042} = \frac{0,248 - 0,231}{x} \rightarrow x = 0,025$$

$$Q_1 = 0,231 + x = 0,256 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Dengan cara seperti pada langkah sebelumnya, di dapat :

$$h_{f1} = 4,537 \text{ m}$$

Elevasi garis tekanan di C =  $196,7 - 4,537 = 192,163$  m

$$h_C = 192,163 - 162,6 = 29,563 \text{ m}$$

$$h_{f2} = h_C - z_B = 2,163 \text{ m}$$

$$Q_2 = 0,091 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Kehilangan tenaga pada pipa 3 :

$$h_{f3} = h_C = 29,563 \text{ m}$$

Didapat :

$$Q_3 = 0,163 \text{ m}^3/\text{dtk}$$

Persamaan kontinuitas :

$$Q_1 - (Q_2 + Q_3) = 0,001 \approx 0 \text{ (sudah dipenuhi)}$$

Jadi :

$$Q_1 = 0,256 \text{ m}^3/\text{dtk}; \quad Q_2 = 0,091 \text{ m}^3/\text{dtk}; \quad Q_3 = 0,163 \text{ m}^3/\text{dtk}$$