

MENGATASI KEHILANGAN ENERGI PRIMER YANG BERLEBIHAN PADA JARINGAN PIPA DISTRIBUSI AIR MENGGUNAKAN MODEL KOMPUTER WATERGEMS

M. Baitullah Al Amin¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya,
Jl. Raya Palembang - Prabumulih Km.32, Indralaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan
Telp: 081368768186, Fax: (0711) 580139
Email: baitullah@unsri.ac.id

ABSTRAK

Kehilangan energi yang berlebihan (terlalu besar) mengakibatkan penurunan energi tekanan pada air yang mengalir di sepanjang pipa secara drastis sehingga energi tekanan sisa di hilir saluran menjadi sangat kecil dan bahkan dapat menjadi negatif. Hal ini dapat menyebabkan sistem jaringan pipa tidak mampu mendistribusikan air ke semua titik dengan tekanan yang cukup. Makalah ini membahas cara untuk mengatasi kehilangan energi primer yang berlebihan pada jaringan pipa distribusi air melalui pemodelan komputer. Program yang digunakan adalah WaterGEMS v8i. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tekanan negatif di setiap *node* sangat dipengaruhi oleh besarnya kehilangan energi primer. Pembesaran diameter pipa secara tepat dapat memperbaiki kapasitas sistem jaringan pipa sehingga kehilangan energi primer menjadi relatif kecil serta tekanan di setiap *node* menjadi positif.

Kata kunci: Jaringan pipa, kehilangan energi, sistem distribusi, WaterGEMS.

1. PENDAHULUAN

Tujuan utama sistem distribusi air adalah untuk mendistribusikan air kepada konsumen dengan kuantitas yang disyaratkan dan tekanan yang cukup. Oleh karena itu, prinsip-prinsip perencanaan, rancangan, dan konstruksinya perlu untuk dipahami dengan baik agar sistem dapat berfungsi sebagaimana mestinya.

Sistem distribusi air yang umumnya diterapkan di Indonesia merupakan sistem aliran pipa bertekanan (*pressurized pipe flow*) dengan konfigurasi cabang, *loop*, atau kombinasi dari keduanya. Permasalahan klasik yang masih sering terjadi di banyak sistem distribusi air diantaranya adalah pengaliran air yang belum sesuai dengan kebutuhan baik dari segi kuantitas, kualitas, maupun tekanan air. Dari segi kuantitas, masalah umum yang paling sering terjadi adalah pengaliran bergilir dimana distribusi air pada suatu daerah pelayanan tidak dapat dilakukan selama 24 jam. Artinya, sebagian daerah pelayanan tidak terairi pada waktu-waktu tertentu, atau bahkan di daerah yang lain tidak memperoleh air sama sekali. Hal ini dapat disebabkan karena jumlah air yang tersedia di sumber air tidak sesuai (kurang) dari jumlah yang dibutuhkan oleh konsumen, misalnya pada musim kemarau. Penyebab lainnya adalah karena kapasitas dari jaringan pipa yang memang tidak memadai untuk mengalirkan air dengan jumlah yang dibutuhkan. Pada kasus ini, air yang tersedia di sumber air

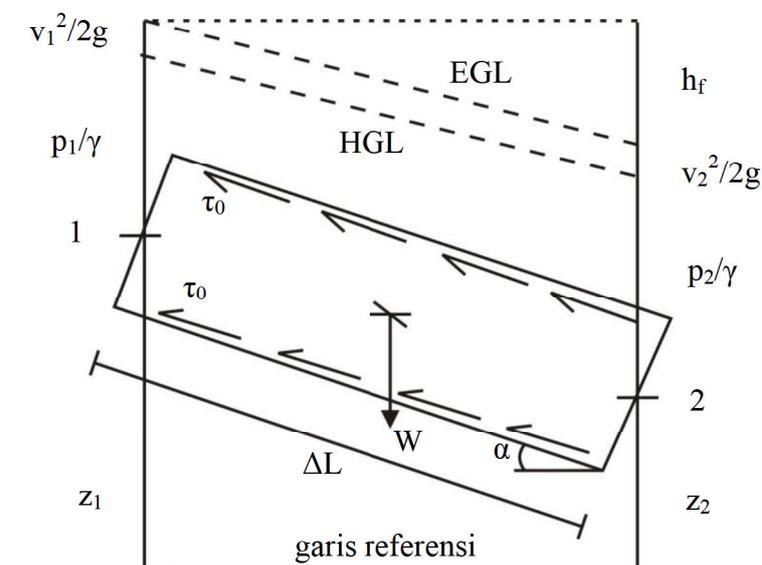
lebih dari cukup dibandingkan dengan yang dibutuhkan, namun karena perencanaan dan perancangan jaringan pipa yang dibangun tidak tepat sehingga jaringan pipa tidak dapat bekerja optimal. Misalnya, pipa yang direncanakan tidak memperhatikan aspek ketersediaan energi tekanan sisa. Padahal, pipa merupakan faktor utama yang menentukan energi tekanan sisa karena adanya pengaruh gesekan antara air dengan dinding pipa selama pengaliran air yang menyebabkan terjadi kehilangan energi.

Kehilangan energi pada sistem distribusi air dibedakan menjadi dua, yaitu kehilangan energi primer dan kehilangan energi sekunder. Kehilangan energi primer disebabkan oleh adanya gesekan air dengan dinding pipa selama pengaliran, sedangkan kehilangan energi sekunder dapat terjadi akibat penggunaan katup, sambungan, belokan, pembesaran dan penyempitan penampang pipa, dan sebagainya. Untuk pipa yang sangat panjang, kehilangan energi primer lebih dominan sehingga pengaruh kehilangan energi sekunder dapat diabaikan.

Triatmadja (2000) dalam Al Amin (2009) menyebutkan bahwa kehilangan energi sebesar 10 m/1.000 m atau kemiringan kehilangan energi pada pipa melebihi 1% dianggap cukup besar atau mungkin terlalu besar bagi pipa dengan selisih elevasi antara ujung hulu dan hilirnya yang relatif kecil. Kehilangan energi yang berlebihan (terlalu besar) dapat menyebabkan penurunan energi tekanan secara drastis sehingga energi tekanan sisa di hilir saluran menjadi sangat kecil bahkan negatif. Hal ini ditunjukkan pada air mengalir dengan tekanan yang sangat kecil sehingga tidak cukup untuk mengaliri air pada rumah-rumah yang berlantai dua atau lebih jika tidak dibantu dengan pompa. Bahkan, mungkin air tidak mengalir sama sekali ke rumah-rumah konsumen yang letaknya cukup jauh karena memang tidak lagi tersedia tekanan sisa. Oleh karena itu, jaringan pipa harus direncanakan dan dirancang dengan tepat. Namun, apabila sistem distribusi terlanjur telah diterapkan di lapangan, maka evaluasi jaringan dirasa perlu dilakukan terhadap jaringan pipa yang telah beroperasi namun tidak bekerja secara optimal.

2. DASAR TEORI

Pada zat cair (fluida) yang mengalir di dalam bidang batas (pipa) akan terjadi tegangan geser dan gradien kecepatan pada seluruh medan aliran karena adanya gaya kekentalan (viskositas). Tegangan geser tersebut akan menyebabkan terjadinya kehilangan energi selama pengaliran fluida. Salah satu persamaan kehilangan energi primer yang umumnya sering digunakan adalah persamaan Darcy-Weisbach.



Gambar 1. Ilustrasi persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli atau persamaan energi pada suatu pipa tunggal dapat diturunkan dari Gambar 1 di atas yang harus dipenuhi dalam analisis jaringan pipa, yaitu:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad \dots (1)$$

dimana z_1 dan z_2 masing-masing adalah elevasi pada titik 1 dan titik 2, p_1/γ dan p_2/γ adalah tinggi energi tekanan (*pressure head*) pada titik 1 dan titik 2, $v_1^2/2g$ dan $v_2^2/2g$ adalah tinggi energi kecepatan (*velocity head*) pada titik 1 dan titik 2, dan h_f adalah kehilangan energi primer. Nilai $z + p/\gamma$ disebut sebagai tinggi piezometrik (*piezometric head*), sedangkan nilai $z + p/\gamma + v^2/2g$ disebut sebagai total tinggi energi (*total head*). Plot tinggi piezometrik di sepanjang jalur pipa disebut sebagai garis energi hidraulik (*hydraulic grade line*) atau yang disingkat sebagai HGL. Sedangkan plot total tinggi energi di sepanjang jalur pipa disebut sebagai garis total energi (*energy grade line*) atau yang disingkat sebagai EGL. Pada penerapan di lapangan secara luas, tinggi energi kecepatan dapat diabaikan sehingga HGL dan EGL adalah sama.

Persamaan kehilangan energi primer yang diusulkan oleh Darcy-Weisbach adalah sebagai berikut:

$$h_f = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 gD^5} \quad \dots (2)$$

dimana f merupakan koefisien gesekan Darcy-Weisbach yang bergantung pada nilai kekasaran pipa dan angka Reynolds, L adalah panjang pipa, D adalah diameter pipa, dan Q adalah debit aliran. Nilai f dapat diperoleh menggunakan persamaan Hagen-Poiseuille untuk aliran laminar, sedangkan untuk aliran turbulen dapat menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Colebrook (1938) yang diselesaikan secara iterasi. Karena proses iterasi memakan waktu yang cukup lama, Moody (1944) membuat kelompok kurva hubungan antara nilai f dan angka Reynolds untuk variasi nilai kekasaran relatif yang kemudian disebut sebagai diagram Moody. Dengan demikian, penyelesaian nilai f secara grafis menjadi lebih mudah. Namun, dengan semakin berkembangnya ilmu mekanika fluida dan penggunaan model komputer, diagram Moody mulai ditinggalkan.

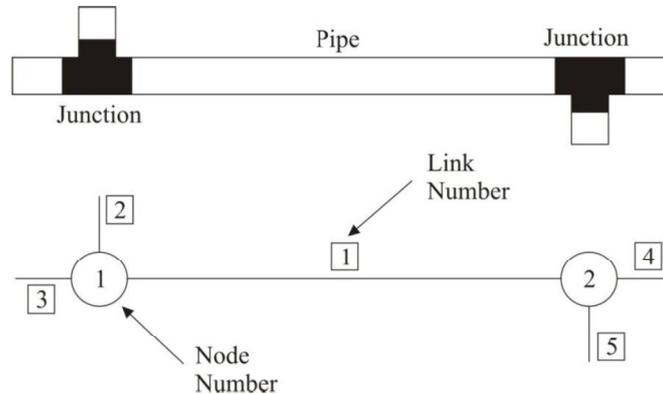
Swamee dan Jain (1976) dalam Mays (2000) mengusulkan persamaan koefisien gesekan f yang terkenal dan banyak digunakan pada model komputer yaitu sebagai berikut:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \dots (3)$$

dimana k adalah nilai kekasaran pipa yang tergantung dari jenis dan umur pipa, dan Re adalah angka Reynolds. Berbeda dengan persamaan Colebrook, persamaan Swamee dan Jain tidak membutuhkan iterasi dalam memperoleh nilai f .

Model komputer merupakan tiruan sistem jaringan pipa yang sesungguhnya yang dibangun dalam suatu program komputer. Model tersebut terdiri dari kumpulan pipa

yang disebut sebagai *links* yang terhubung secara bersama-sama pada tiap ujungnya yang disebut sebagai *nodes* seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Dalam skema tersebut, *links* merepresentasikan pipa-pipa, pompa, atau katup pengatur, sedangkan *nodes* merepresentasikan sambungan pipa (*junction*), reservoir, dan tangki.



Gambar 2. Representasi *node-link* dalam sistem jaringan pipa

Aliran masuk dan keluar dalam sistem biasanya dianggap terjadi pada *node*. Pada jaringan pipa dengan konfigurasi *loop* harus dipenuhi persamaan kontinuitas dan persamaan energi sebagai berikut.

1. Aliran di dalam pipa harus memenuhi hukum gesekan pipa untuk aliran dalam pipa tunggal seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (2).
2. Aliran masuk ke dalam tiap-tiap *node* harus sama dengan aliran yang keluar.

$$\sum Q_i = 0 \dots (4)$$

3. Jumlah aljabar kehilangan energi dalam suatu *loop* harus sama dengan nol.

$$\sum h_f = 0 \dots (5)$$

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

$$h_f = KQ^2 \dots (6)$$

dengan: $K = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5}$

Persamaan-persamaan di atas diselesaikan secara iterasi menggunakan beberapa metode diantaranya metode Hardy Cross, Newton-Raphson, dan teori linier (*linear theory method*).

3. METODE

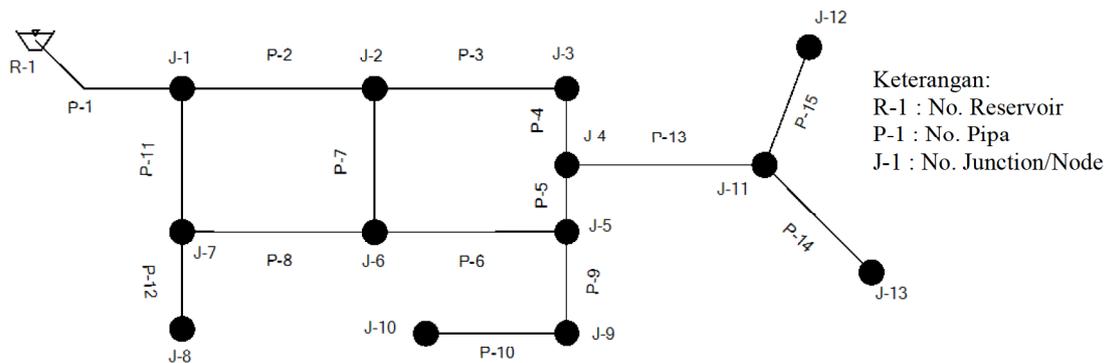
Makalah ini membahas cara mengatasi kehilangan energi primer yang berlebihan melalui pemodelan komputer. Program komputer yang digunakan adalah WaterGEMS V8i. Program tersebut sudah dikenal secara luas untuk memodelkan jaringan pipa terutama jaringan pipa yang sangat rumit dan kompleks untuk diselesaikan secara manual.

Tahap awal dalam pemodelan adalah mempersiapkan sistem jaringan pipa yang akan ditirukan. Data dasar yang diperlukan diantaranya adalah layout jaringan pipa, karakteristik *node*, reservoir dan pipa, serta kebutuhan air konsumen. Selanjutnya dilakukan pembangunan model menggunakan WaterGEMS V8i, menentukan pilihan simulasi, dan menjalankan simulasi. Pengamatan dilakukan terhadap *node* yang memiliki tekanan negatif dan kehilangan energi primer yang terlalu besar pada setiap

link. Optimasi dilakukan terhadap jaringan tersebut agar tidak terdapat tekanan yang negatif dan kehilangan energi yang terlalu besar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jaringan pipa yang ditinjau dalam makalah ini ditunjukkan dalam Gambar 3. Jaringan tersebut terdiri dari konfigurasi cabang dan *loop* yang memiliki satu buah sumber air (reservoir). Elevasi reservoir lebih tinggi dibandingkan dengan node lainnya di dalam jaringan, sehingga pengaliran air terjadi secara gravitasi. Tabel 1 dan 2 masing-masing memberikan nilai untuk karakteristik setiap *node* dan pipa.



Gambar 3. Jaringan pipa yang ditinjau

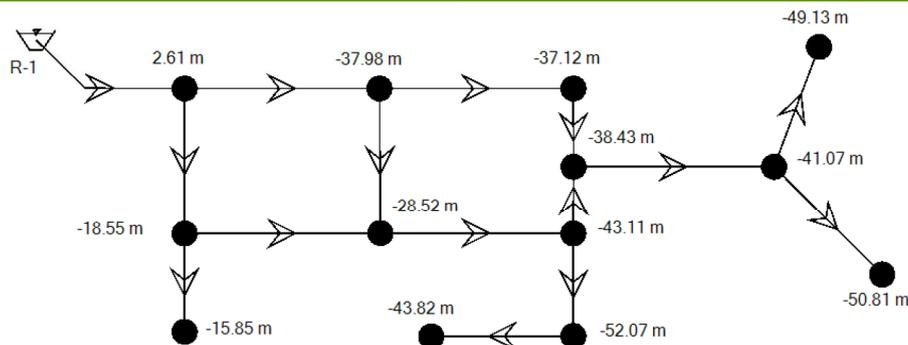
Tabel 1. Karakteristik *node*

Node	Elevasi (m)	Kebutuhan Air (L/det)	Node	Elevasi (m)	Kebutuhan Air (L/det)
R-1	175	-	J-7	120	3,0
J-1	120	3,5	J-8	115	2,0
J-2	125	2,0	J-9	120	2,5
J-3	115	1,0	J-10	110	1,5
J-4	115	0,0	J-11	115	0,0
J-5	120	2,0	J-12	120	2,0
J-6	115	3,0	J-13	120	2,5

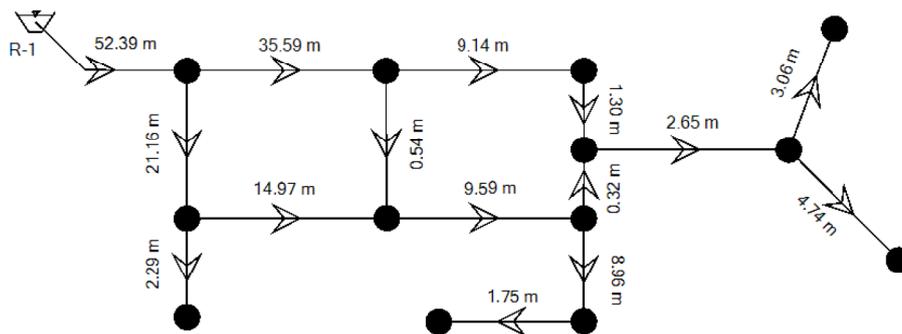
Tabel 2. Karakteristik pipa

Pipa	Panjang (m)	Diameter (mm)	ϵ (m)	Pipa	Panjang (m)	Diameter (mm)	ϵ (m)
P-1	2.000	150	0,0015	P-9	1.500	100	0,0015
P-2	3.000	100	0,0015	P-10	2.000	100	0,0015
P-3	3.000	100	0,0015	P-11	2.000	150	0,0015
P-4	1.000	100	0,0015	P-12	1.500	100	0,0015
P-5	1.000	150	0,0015	P-13	3.000	150	0,0015
P-6	3.000	150	0,0015	P-14	2.000	100	0,0015
P-7	2.000	100	0,0015	P-15	2.000	100	0,0015
P-8	3.000	150	0,0015				

Hasil simulasi menggunakan WaterGEMS V8i menunjukkan sistem tidak mampu mengalirkan air ke seluruh *node* dengan tekanan yang cukup. Tekanan negatif terjadi di sebagian besar *node* seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4. Tekanan negatif tersebut dipengaruhi kehilangan energi yang terlalu besar di beberapa pipa. Hasil simulasi terhadap kehilangan energi pada pipa ditunjukkan dalam Gambar 5.



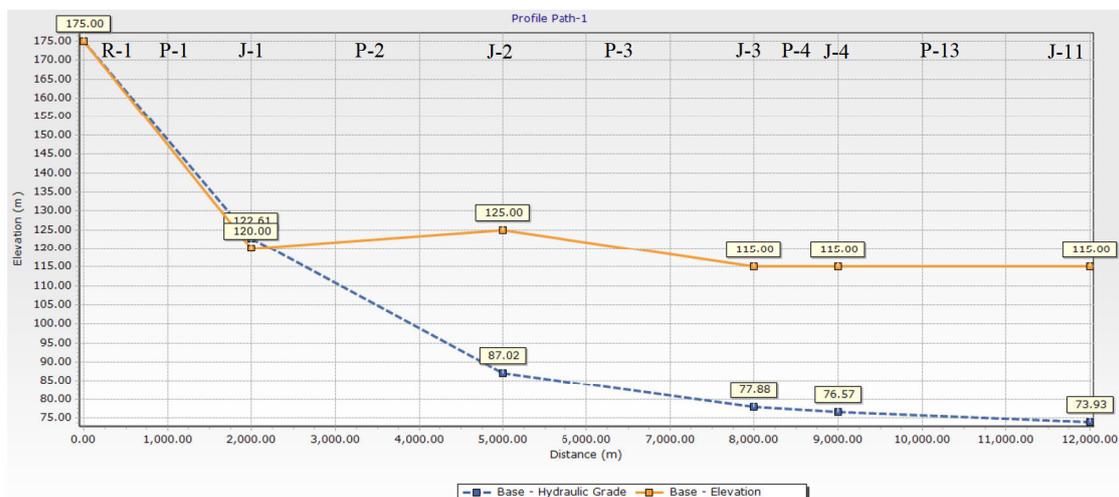
Gambar 4. Tekanan negatif pada *node* setelah proses simulasi



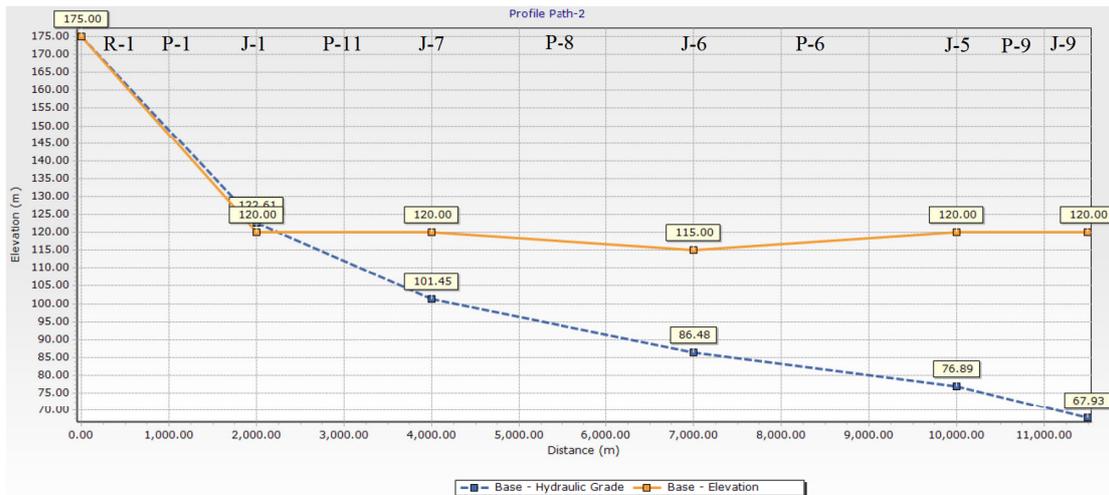
Gambar 5. Kehilangan energi berlebihan pada pipa setelah proses simulasi

Upaya yang dapat dilakukan dalam mengatasi kehilangan energi yang berlebihan adalah dengan mengganti diameter pipa yang bermasalah. Perhatikan persamaan kehilangan energi Darcy-Weisbach pada persamaan (2), dimana dengan memperbesar nilai D sedikit saja akan berpengaruh signifikan terhadap pengurangan nilai h_f . Namun, sebelum menentukan pipa mana yang akan diperbesar diameternya, terlebih dahulu harus diamati profil garis energi hidraulik (*hydraulic grade line*) terhadap elevasinya. Langkah ini diperlukan agar penggantian diameter pipa menjadi tepat.

Pada kasus sistem di atas, ditetapkan dua jalur (*path*) yang akan diamati profil garis energi hidraulik terhadap elevasinya, yaitu jalur atas yang diberi nama *Path-1* dan jalur bawah *Path-2*. Jalur atas (*Path-1*) secara berurutan adalah R-1>P-1>J-1>P-2>J-2>P-3>J-3>P-4>J-4>P-13>J-11, sedangkan jalur bawah (*Path-2*) secara berurutan adalah R-1>P-1>J-1>P-11>J-7>P-8>J-6>P-6>J-5>P-9>J-9. Profil untuk *Path-1* dan *Path-2* masing-masing ditunjukkan dalam Gambar 6 dan Gambar 7.

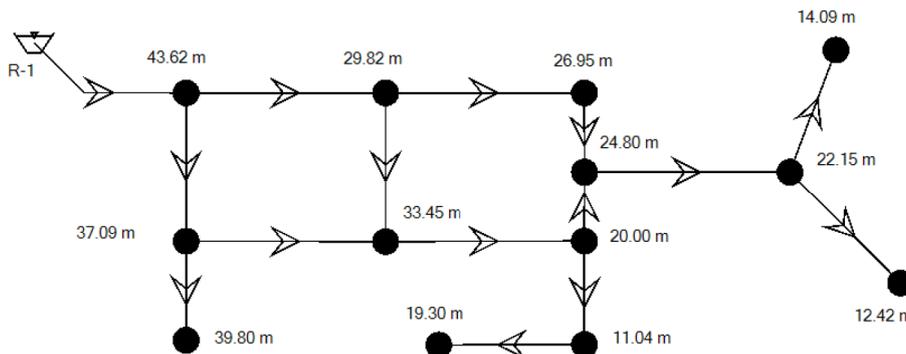


Gambar 6. Profil garis energi hidraulik terhadap elevasi untuk *Path-1*

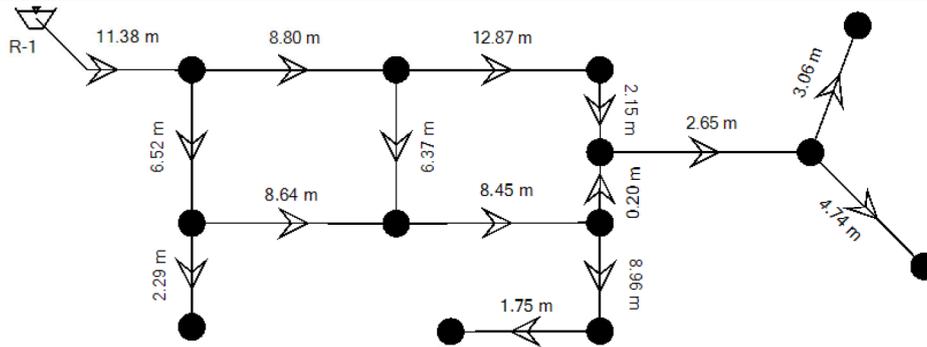


Gambar 7. Profil garis energi hidraulik terhadap elevasi untuk *Path-2*

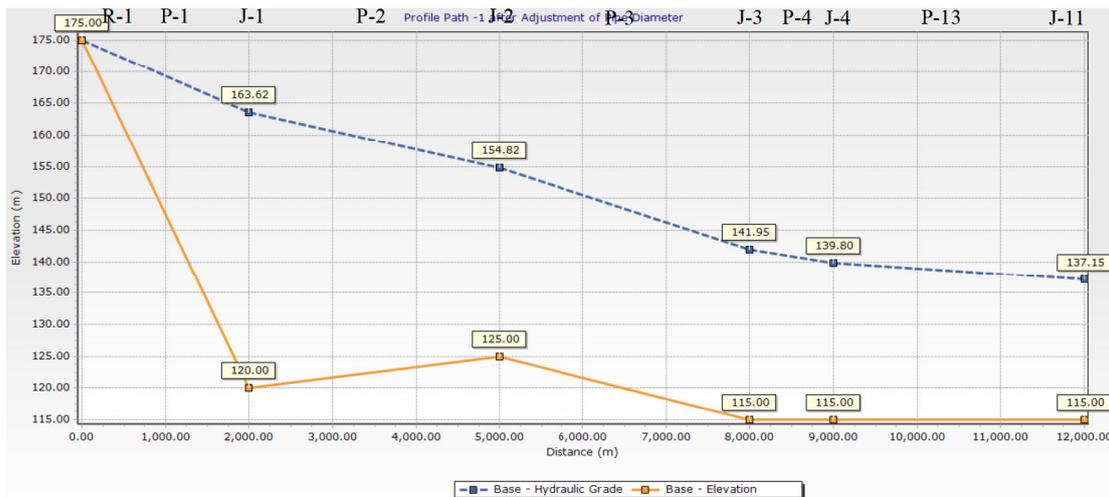
Dari pengamatan profil untuk setiap jalur di atas, ditentukan pipa yang bermasalah dan harus diperbesar diameternya adalah pipa P-1, P-2, dan P-11. Hal ini disebabkan karena pada pipa P-1 untuk *Path-1* (Gambar 6), kehilangan energi yang terlalu besar menyisakan tekanan di hilir saluran (*node* J-1) hanya sebesar 2,61 m (122,61 – 120,00 m) sehingga tekanan di hilir pipa P-2 sudah menjadi negatif yang ditunjukkan oleh garis energi hidraulik berada di bawah elevasinya. Begitu juga halnya untuk *Path-2* (Gambar 7), dimana tekanan sisa di hilir pipa P-1 telah menjadi menjadi negatif di hilir pipa P-11. Dengan demikian, diameter pipa P-1, P-2, dan P-11 masing-masing diperbesar menjadi 200 mm, 150 mm, dan 175 mm. Hasil simulasi untuk tekanan di setiap *node* dan kehilangan energi di setiap pipa setelah dilakukan pembesaran pipa ditunjukkan dalam Gambar 8 dan Gambar 9. Sedangkan profil *Path-1* dan *Path-2* setelah perbaikan masing-masing ditunjukkan dalam Gambar 10 dan Gambar 11.



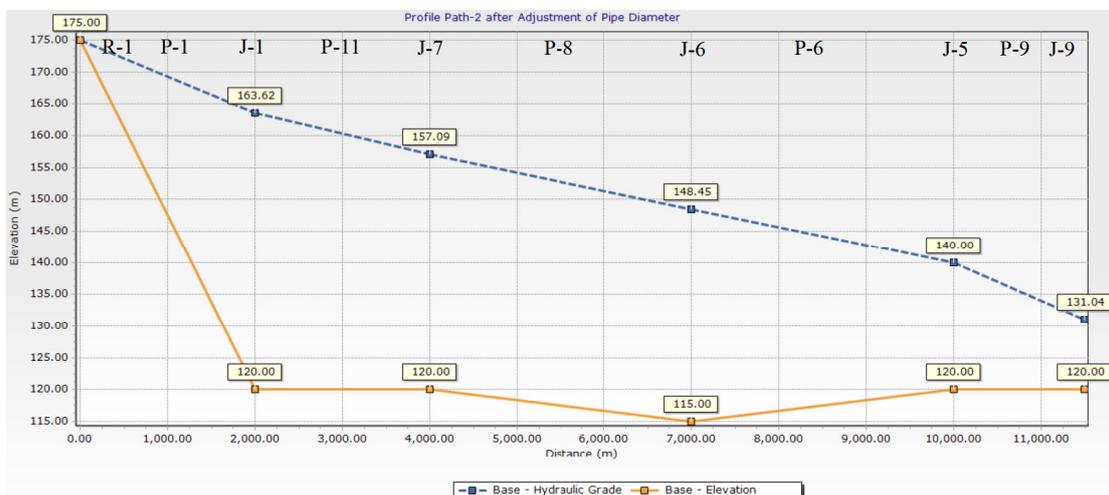
Gambar 8. Tekanan positif pada setiap *node* setelah pembesaran diameter pipa



Gambar 9. Kehilangan energi yang kecil pada pipa setelah pembesaran diameter



Gambar 10. Profil *Path-1* setelah pembesaran diameter pipa



Gambar 11. Profil *Path-2* setelah pembesaran diameter pipa

Setelah dilakukan perbaikan sistem dengan cara memperbesar pipa yang bermasalah, diperoleh tekanan yang positif di setiap *node* dan kehilangan energi yang relatif kecil ($< 10 \text{ m}/1.000 \text{ m}$) pada setiap pipa. Profil aliran di sepanjang *Path-1* dan *Path-2* juga menunjukkan bahwa sistem mampu mengalirkan air dengan tekanan yang cukup ke setiap *node*.

Langkah-langkah di atas pada dasarnya dapat diterapkan pada sistem jaringan pipa yang lebih luas dan kompleks. Pengamatan menggunakan model komputer akan



sangat memudahkan pengguna sehingga penyelesaian masalah kehilangan energi primer yang berlebihan menjadi tepat dan cepat.

5. KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari pembahasan di atas diantaranya adalah:

1. Pengamatan terhadap kehilangan energi yang berlebihan dapat dilakukan dengan sangat mudah apabila dibantu dengan model komputer.
2. Perbaikan kehilangan energi yang berlebihan dapat dilakukan dengan pembesaran pipa setelah dilakukan pengamatan terhadap profil garis energi hidraulik terhadap elevasi pada jalur pipa yang ditetapkan.
3. Apabila sistem jaringan pipa menggunakan pompa, maka kehilangan energi yang relatif kecil akan menjadikan penggunaan pompa lebih efisien dari segi penyediaan tekanan sisa.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Al Amin, M.B., 2009, *Simulasi Konsentrasi Sisa Klorin pada Jaringan Distribusi Air Minum (Studi Kasus Zona Air Minum Prima PDAM Kabupaten Magelang)*, Tesis, Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Al Amin, M.B., 2011, *Komputasi Analisis Hidraulika Jaringan Pipa Air Minum*, Prosiding Seminar Nasional Kebumihan 2011, 3: 18 – 29, Yogyakarta.
- Mays, L.W., 2000, *Water Distribution System Handbook*, McGraw-Hill Co., USA.
- Mays, L.W., 2001, *Water Resources Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Munson, B. R., dkk., 2009, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Swamee, K.P., dan Ashok, K.S., 2008, *Design of Water Supply Pipe Networks*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Triatmadja, R., 2009, *Hidraulika Sistem Jaringan Perpipaan Air Minum*, Penerbit Beta Offset, Yogyakarta.
- Triatmodjo, B., 2003, *Hidraulika II*, Penerbit Beta Offset, Yogyakarta.

