

Optimasi Jaringan Pipa Air Ber-loop Menggunakan Metode *Simulated Annealing*

Samuel Theodore^{1,a}, Warjito^{1,b*}

¹ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Email: ^a samueltheodore21@gmail.com email, ^b warjito@eng.ui.ac.id

Abstrak

Jaringan pipa merupakan investasi yang besar, sehingga perlu dilakukan optimasi untuk mendapatkan jaringan pipa yang efektif dan efisien dengan biaya minimal. Penelitian ini menggunakan Metode *Simulated Annealing* untuk mengoptimasi jaringan pipa air. Kriteria-kriteria optimasi dalam bentuk persamaan tujuan dan pembatas telah dikembangkan. Metode *Hardy Cross* digunakan untuk melakukan koreksi aliran pada jaringan pipa. Setelah melakukan *input* parameter-parameter *simulated annealing*, optimasi akan bekerja dan kemudian hasil yang didapat adalah biaya optimal, diameter pipa, kecepatan aliran, dan *head* pada setiap *node*. Proses optimasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *simulated annealing* merupakan metode yang baik untuk optimasi jaringan pipa namun demikian perlu hati-hati dalam penentuan solusi awal karena mempengaruhi proses dan hasil optimasi.

Kata kunci : Optimasi, Jaringan pipa air, *Simulated annealing*.

Pendahuluan

Jaringan pipa merupakan sebuah sistem transportasi untuk mengirimkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain. Jaringan pipa memiliki keunggulan dari segi pengiriman, yaitu tidak terkendala oleh cuaca dan kemacetan lalu lintas apabila dibandingkan dengan menggunakan moda transportasi lainnya.

Proses desain merupakan faktor yang penting dalam membangun sebuah jaringan pipa. Dengan desain yang optimum, maka biaya pembangunan jaringan pipa bisa ditekan, dengan hasil yang baik juga. Dengan demikian, kemungkinan terjadi kerusakan dini akibat desain yang kurang baik dapat diminimalkan.

Optimasi jaringan pipa telah banyak dilakukan, dan telah banyak juga metode atau algoritma yang dikembangkan oleh para peneliti. Beberapa penelitian dibidang tersebut adalah: optimasi jaringan pipa air *single pipe* yang dilakukan oleh Savic dan Walters [1] menggunakan metode algoritma genetika, Cunha dan Sousa [2] menggunakan metode *simulated annealing*, dan Djebadjian et al [3] menggunakan metode *sequential unconstrained minimization technique* (SUMT).

Optimisasi yang akan dilakukan adalah menggunakan Metode Simulated Annealing (SA). SA memiliki keunggulan untuk menyelesaikan permasalahan kombinatorial [4]. Penggunaan metode ini bertujuan supaya optimasi dapat dilakukan dengan lebih efektif dibandingkan dengan metode *trial and error*. SA merupakan

metode adopsi dari proses pendinginan secara annealing pada bidang metalurgi. Optimasi dilakukan pada sistem jaringan pipa air tertutup. Optimasi yang dilakukan meliputi diameter setiap pipa, yang kemudian juga menekan estimasi biaya investasi yang dibutuhkan untuk membangun jaringan pipa tersebut

Tinjauan Teori

Metode *Hardy Cross* digunakan sebagai metode koreksi untuk aliran yang diasumsikan pada sebagai solusi awal maupun dalam proses optimasi. Metode *Hardy Cross* merupakan metode yang paling populer untuk melakukan koreksi aliran [4]. Metode *Hardy Cross* menggunakan persamaan berikut dalam melakukan koreksi aliran:

1. Jumlah aliran masuk dan keluar pada satu *node* haruslah sama dengan jumlah *demand* pada *node* tersebut (prinsip kontinuitas)

$$\sum_{i \in in(j)} Q_i - \sum_{i \in out(j)} Q_i = q_j \quad (1)$$

dimana Q_i adalah aliran yang masuk/keluar

pada pipa i yang bertemu pada *node* k . $q_j >$

0 jika *node* j merupakan *demand node*, dan $q_j < 0$ jika *node* j merupakan *supply node*.

2. Jumlah *head loss* pada sebuah *loop* harus sama dengan nol

$$\sum_{i \in \text{loop}(n)} \pm h_{fi} = 0 \quad (2)$$

dimana h_{fi} merupakan *headloss* pada pipa i yang merupakan bagian dari *loop* n.

Persamaan *head loss* yang digunakan adalah Persamaan Hazen-Williams. Persamaan Hazen-Williams banyak digunakan pada aplikasi yang menggunakan air [5]:

$$h_f = \alpha L (Q/C)^{1.852} D^{-4.87} \quad (3)$$

Dimana α merupakan konstanta *head loss* ($\alpha=10.67$ untuk satuan SI), L merupakan panjang

pipa (m), Q merupakan debit (m^3/s), C merupakan koefisien kekasaran Hazen-Williams (C yang digunakan adalah 130), D merupakan diameter pipa (m).

Dalam melakukan optimasi, dibutuhkan sebuah fungsi objektif sebagai tujuan dari optimasi. Dalam penelitian ini, fungsi objektif yang digunakan adalah:

$$F = \min \sum_{j=1}^n l_j \cdot c(d_j) \quad (4)$$

dimana l_j merupakan panjang pipa ke-j, $c(d_j)$

merupakan harga dari diameter pipa ke-j, dan n merupakan jumlah pipa yang digunakan dalam *network*.

SA merupakan metode optimasi yang diadopsi dari proses pendinginan material secara annealing. Pada proses annealing, material dipanaskan sehingga atom-atom pada material dapat bergerak bebas. Kemudian dilakukan pendinginan yang terkontrol sehingga terjadi proses kristalisasi dan *internal energy* dari material adalah minimum. Keunggulan metode SA adalah kemampuan untuk tidak terperangkap pada optimum lokal.

SA dimulai dengan membangun solusi awal (S_i) dan menentukan temperatur awal (T_0).

Kemudian, penyusunan ulang solusi baru dilakukan dengan mencari solusi tetangga (S_j).

Solusi baru diterima apabila ΔE lebih kecil daripada 0, yang berarti solusi baru lebih baik dari solusi awal. Dimana

$$\Delta E = f(S_j) - f(S_i) \quad (5)$$

yaitu selisih nilai solusi baru dengan solusi awal. Apabila ΔE merupakan nilai positif, namun masih

memenuhi $(\exp\left(\frac{-\Delta E}{T}\right) > \text{nilai random antara}$

$(0,1)$, maka solusi akan tetap diterima. Penyusunan ulang solusi awal dilakukan berulang kali sampai jumlah iterasi yang telah diinginkan dan sampai temperatur akhir (T_f) tercapai dengan laju

penurunan temperatur (α) yang telah ditentukan.

Berikut proses-proses pada SA:

a. *Annealing Scheduling*

Untuk menghindari terperangkap pada nilai optimum lokal, terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan. Yang pertama adalah pemilihan temperatur awal dan akhir. Temperatur berfungsi untuk mengontrol penerimaan terhadap solusi baru. Pemilihan temperatur awal harus dibuat tinggi supaya penerimaan terhadap solusi baru lebih luas. Yang kedua adalah pemilihan jumlah iterasi (pada setiap temperatur). Jumlah iterasi ini memengaruhi jumlah penyusunan ulang yang dilakukan. Dengan jumlah iterasi yang besar, maka nilai yang didapatkan bisa semakin konstan. Yang ketiga adalah pemilihan nilai laju penurunan temperatur (*cooling rate*) α .

Pemilihan nilai α juga dapat mempengaruhi nilai yang akan didapat. Nilai α pada SA berkisar antara 0 dan 1. Menurut Kirkpatrick et al., nilai α yang disarankan adalah antara 0.8 dan 0.99 [4]. Sehingga temperatur berikutnya merupakan:

$$T_t = \alpha \cdot T_{t-1} \quad (6)$$

dimana T_0 merupakan nilai yang diinisiasi, dan

$t=1,2,\dots$

b. *Rearrangement of the system*

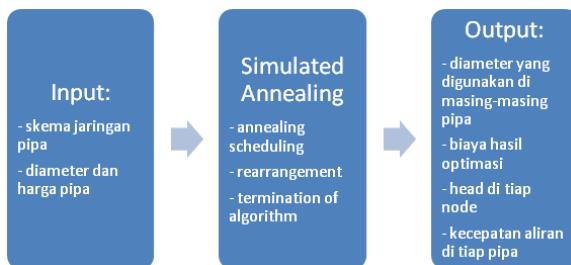
Rearrangement adalah melakukan penyusunan ulang solusi baru/tetangga secara acak.

c. *Termination of Algorithm*

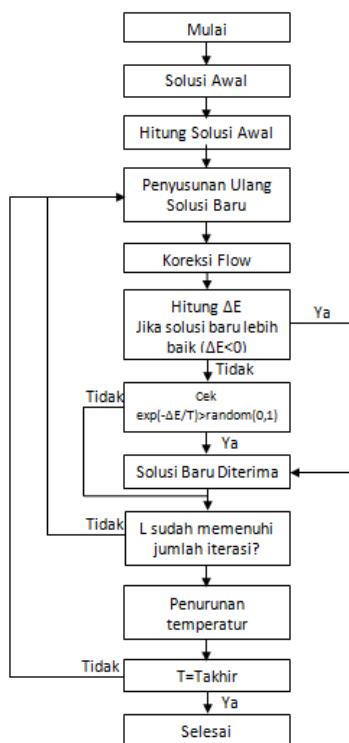
Penghentian algoritma dilakukan setelah tercapainya kriteria untuk berhenti, yaitu parameter-parameter yang diatur pada awal proses SA.

Metode Penelitian

Penelitian dilakukan dengan skema sebagai berikut: identifikasi masalah, studi literatur, pemodelan, simulasi, analisis. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MatLab mengikuti alur seperti pada gambar 1. Diagram alir optimasi ditunjukkan gambar 2.



Gambar 1. Alur pembangunan perangkat lunak



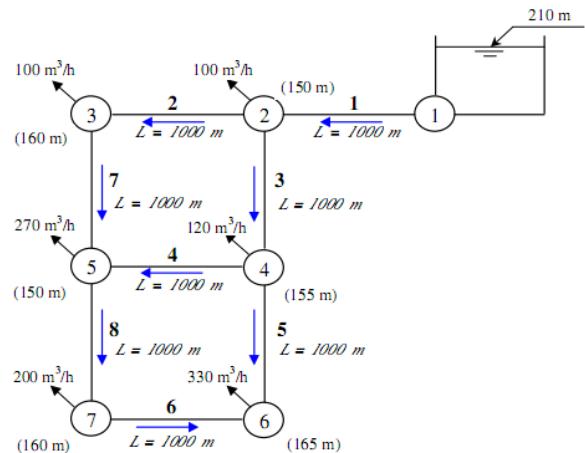
Gambar 2. Flow chart SA

Hasil Penelitian

Optimasi jaringan pipa dilakukan pada jaringan *two-loop* yang diperkenalkan oleh Alperovits dan Shamir [3] seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pada jaringan ini terdapat 8 pipa, 7 node dengan elevasi dan kebutuhan debitnya masing-masing

(node 1 merupakan tangki *reservoir/sumber*), dan diketahui jarak antar *node* adalah 1000 m. Asumsi flow yang digunakan (panah biru) menggunakan asumsi flow pada penelitian Berge Djebedjian et al [3].

Pada metode SA, solusi awal sangatlah penting untuk memulai optimasi. Sebagai langkah pertama, dari setiap *node* (kecuali *source node*) dibuat persamaan sesuai dengan persamaan (2).



Gambar 3. Jaringan pipa air yang akan dioptimasi [3]

$$\text{Node 2: } Q_1 - Q_2 - Q_3 = 100$$

$$\text{Node 3: } Q_2 - Q_7 = 100$$

$$\text{Node 4: } Q_3 - Q_4 - Q_5 = 120$$

$$\text{Node 5: } Q_4 + Q_7 - Q_8 = 270$$

$$\text{Node 6: } Q_5 + Q_6 = 330$$

$$\text{Node 7: } Q_8 - Q_6 = 200$$

Debit diasumsikan sehingga memenuhi persamaan tersebut. Salah satu solusi yang memenuhi adalah:

$$Q_1 = 1120 \quad Q_5 = 195$$

$$Q_2 = 510 \quad Q_6 = 135$$

$$Q_3 = 510 \quad Q_7 = 410$$

$$Q_4 = 195 \quad Q_8 = 335$$

Kemudian diameter pipa dihitung menggunakan persamaan yang diturunkan dari $Q = A \cdot v$ atau

menjadi $D = \sqrt{\frac{4Q}{v\pi}}$. Dengan asumsi kecepatan air dalam pipa adalah 1 m/s, didapatkan hasil solusi awal diameter dari jaringan *two loop* seperti ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Solusi awal jaringan *two loop*

pipa ke-	1	2	3	4
D (inch)	24	16	16	10
V (m/s)	1.07	-1.06	1.12	0.85
Q (m ³ /h)	1120	-495	525.1 7	155
H (m)		58.34	45.70	50.39

pipa ke-	5	6	7	8
D (inch)	10	8	14	14
V (m/s)	1.37	-0.68	-1.10	-0.78
Q (m ³ /h)	251	-79.4	-394.8	-279.4
H (m)	52.37	33.01	40.62	

*Tanda negatif pada V dan Q berarti berlawanan arah *loop*. Pada solusi awal, pipa 2,6,7, dan 8 berlawanan dengan arah *loop*

Dengan diameter awal tersebut, aliran jaringan pipa dikoreksi menggunakan Metode Hardy Cross dan dihitung kecepatan aliran beserta *head*-nya. Perhitungan *head* (H) pada *node* dilakukan dengan mengurangi *head source* dengan *head loss* (h_f) pada setiap pipa yang dilewati sampai mencapai *node*, kemudian dikurangi dengan elevasi *node* tersebut:

$$H_2 = 210 - h_{f1} - 150$$

$$H_3 = 210 - h_{f1} - h_{f2} - 160$$

$$H_4 = 210 - h_{f1} - h_{f3} - 155$$

$$H_5 = 210 - h_{f1} - h_{f2} - h_{f7} - 150$$

$$H_6 = 210 - h_{f1} - h_{f3} - h_{f5} - 165$$

$$H_7 = 210 - h_{f1} - h_{f2} - h_{f7} - h_{f8} - 160$$

Setelah mendapatkan solusi awal, optimasi mulai dilakukan dengan fungsi objektif sesuai dengan persamaan (4). Dengan batasan yang digunakan adalah:

1. *Head* minimum pada setiap *node* adalah 30 m (merupakan batasan dari kasus

jaringan *two loop*, yang digunakan juga dalam penelitian-penelitian sebelumnya)

2. Kecepatan pada setiap pipa tidak boleh melebihi 2 m/s [6]

Biaya penalti akan dikenakan apabila terdapat pelanggaran terhadap batasan tersebut. Biaya penalti dimaksudkan untuk membuat biaya solusi baru menjadi tinggi sehingga kemungkinan solusi tersebut diterima akan semakin kecil. Dapat dilihat pada Tabel 2 mengenai ukuran diameter dan harga (dengan satuan unit).

Tabel 2 Ukuran diameter dan harga pipa

diameter (inch)	harga per meter (unit)
1	2
2	5
3	8
4	11
6	16
8	23
10	32
12	50
14	60
16	90
18	130
20	170
22	300
24	500

Berikut merupakan hasil optimasi yang dilakukan:

Tabel 3. Hasil optimasi

pipa ke-	1	2	3	4
D (inch)	20	14	14	8
V (m/s)	1.53	-1.383	1.470	0.696
Q (m ³ /h)	1120	-	525.5 1	81.21
H (m)		55.96	40.91	45.31

pipa ke-	5	6	7	8
D (inch)	12	6	14	12
V (m/s)	1.235	-0.087	-1.103	-0.783
Q (m ³ /h)	324.3 0	-	394.4 9	205.7 0
H (m)	47.59	30.41	35.48	

*Tanda negatif pada V dan Q berarti berlawanan arah *loop*

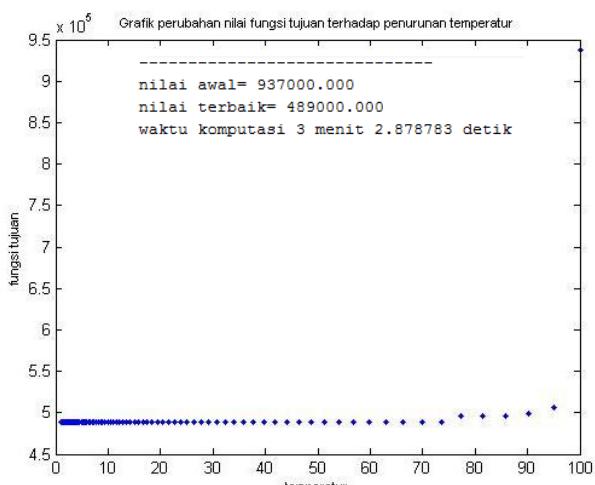
Menurut Tospornsampan et al [4], parameter SA yang baik digunakan untuk jaringan *two loop*

adalah temperatur awal 10-100, alpha 0.9-0.95, sigma 0.1-0.25, dan jumlah iterasi 500-1000. Hasil optimasi yang didapat pada Tabel 3 menggunakan parameter temperatur awal 100 (dan temperatur akhir 1), alpha 0.95, sigma 0.25, dan jumlah iterasi 1000. Hasil optimasi menggunakan MATLAB dapat dilihat pada Gambar 4.

Pada Tabel 4 dapat dilihat perbandingan biaya sebelum dan sesudah dilakukan optimasi. Selain itu, pada Tabel 5 merupakan perbandingan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menggunakan *single pipe* [3].

Pembahasan

Optimasi menggunakan metode SA yang dilakukan berjalan dengan baik, hal ini terlihat dari hasil optimasi pada Tabel 3, dimana *head* pada setiap *node* tidak ada yang dibawah 30 m dan kecepatan aliran pada setiap pipa tidak ada yang melebihi 2 m/s. Berdasarkan Tabel 4 mengenai perbandingan hasil sebelum dan sesudah optimasi, dapat dilihat bahwa optimasi menghasilkan biaya sebesar 489000 atau berhasil melakukan penghematan sebesar 47.81% dari biaya solusi awal (937000).



Gambar 4. Hasil optimasi MATLAB

Tabel 4. Perbandingan sebelum dan sesudah dilakukan optimasi

pipa ke-	diameter	
	solusi awal	hasil optimasi
1	24	20
2	16	14
3	16	14
4	10	8
5	10	12
6	8	6

7	14	14
8	14	12
biaya	937000	489000

Jika dibandingkan dengan penelitian mengenai jaringan *two loop* sebelumnya yang juga menggunakan *single pipe*, penelitian ini menunjukkan hasil yang berbeda. Penelitian ini menghasilkan nilai optimasi yang lebih kecil dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu sebesar 419000. Hal tersebut kemungkinan dapat terjadi karena faktor pembentukan solusi awal. Pada SA, solusi awal yang kurang baik akan membuat solusi yang tidak cukup baik. Diameter pada solusi awal dibentuk dengan menggunakan asumsi aliran. Solusi awal ini sebenarnya tidak mengikat, atau dengan kata lain apabila asumsi besar aliran diubah (namun tetap memenuhi persamaan kontinuitas), maka diameter pada solusi awal pun juga ikut berubah.

Sigma digunakan sebagai pembatas ruang solusi supaya kombinasi pipa yang dihasilkan (*generate*) secara random tidak terlalu jauh menyimpang dari solusi awal yang menyebabkan hasil yang didapat bukan merupakan hasil yang optimal. Selain itu penggunaan sigma bertujuan untuk menjaga arah aliran supaya tidak banyak berubah, yang dapat menyebabkan perhitungan *head* pada *node* menjadi berbeda. Namun demikian penggunaan sigma akan menyebabkan terbatasnya solusi yang dihasilkan apabila solusi awal yang dibentuk bukan merupakan solusi yang baik. Diameter pipa hasil optimasi merupakan tetangga dari solusi awal yang ada. Sebagai contoh, pada pipa ke-6, dengan sigma 0.25, pipa dengan diameter 8" tersebut hanya mungkin digantikan oleh pipa yang berada ± 0.25 dari nilainya sendiri, yaitu pipa 6", 8", dan 10". Hal tersebut sangat merugikan apabila ternyata solusi yang optimal berada di luar *range* diameter tetangga.

Tabel 5. Perbandingan dengan hasil penelitian sebelumnya (*single pipe*)

Pipa ke-	Savic dan Walter (1997)	Cunha dan Sausa (1999)	Djebedjian et al (2000)	Penelitian ini
	D (inch)	D (inch)	D (inch)	D (inch)
1	18	18	18	20
2	10	10	10	14
3	16	16	16	14
4	4	4	4	8

5	16	16	16	12
6	10	10	10	6
7	10	10	10	14
8	1	1	1	12
Biaya	419000	419000	419000	489000

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Metode Simulated Annealing dapat melakukan optimasi yang memenuhi kriteria-kriteria *head* dan kecepatan aliran yang ditentukan. Optimasi dengan metode ini menghasilkan penghematan biaya sebesar 47.81% dari biaya awal.
2. Penetapan solusi awal dan pengambilan nilai sigma harus berhati-hati karena menentukan hasil akhir optimasi. Namun demikian, seperti yang disampaikan oleh Tospornsampan et al [4], bahwa SA tidak menjamin solusi yang dihasilkan merupakan solusi optimum global, namun solusi yang ditawarkan setidaknya sudah cukup baik.

Daftar Referensi

- [1] D.A. Savic and G.A. Walters, Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, vol. 123, no. 2 (1997), 67-77.
- [2] M.D.C. Cunha and J. Sousa, Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach, *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, vol. 125, no. 4 (1999), 215-221.
- [3] Djebedjian, B., Herric, A., & Rayan, M.A. (2000). Modeling and Optimization of Potable Water Network. *International Pipeline Conference (IPC 2000)*.
- [4] Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M., & Kitamura, Y.. Split-Pipe Design of Water Distribution Network Using Simulated Annealing. *International Journal of Environmental, Earth Science and Engineering*, Vol:1 No:4, (2007)
- [5] Monalisa, Penyelesaian Masalah Split Pipe Design Pada Jaringan Distribusi Air Menggunakan Algoritma Simulated Annealing, Skripsi, Perpustakaan Universitas Indonesia, Depok 2009.
- [6] Badan Standardisasi Nasional. RSNI T-01-2003. Tata cara perencanaan plambing.