

OPTIMASI RANCANGAN SALURAN UDARA PENAMPANG SEGIEMPAT BERCABANG BANYAK MEMAKAI METODA KALKULUS

Muhammad Nadjib*

ABSTRAK

Perancangan saluran udara merupakan bagian dari perancangan sistem pengkondisian udara selain perancangan mesin refrigerasi dan unit pengolah udara. Saluran udara menghubungkan unit pengolah udara dan ruangan yang dikondisikan. Dalam perancangan tersebut, perlu diperhatikan aspek ekonomisnya. Ukuran saluran udara sangat menentukan biaya awal instalasi.

Upaya optimasi rancangan dilakukan dengan menerapkan metoda kalkulus untuk saluran penampang segiempat. Ditentukan fungsi tujuan dan fungsi batasnya, kemudian kedua fungsi tersebut diselesaikan memakai Lagrange multiplier.

Dari analisis yang telah dilakukan, diketahui bahwa optimasi rancangan saluran udara memakai metoda kalkulus dapat diaplikasikan pada penampang segiempat. Diperoleh ukuran saluran yang optimum sehingga dapat menekan biaya awal.

Kata Kunci : biaya awal, Lagrange multiplier, metoda kalkulus, optimasi, saluran udara.

PENDAHULUAN

Sasaran pengkondisian udara adalah memperoleh suhu, kelembaban, kebersihan dan distribusi udara dalam ruangan yang dapat dipertahankan pada kondisi yang disyaratkan sesuai kebutuhan ruangan. Untuk mencapai sasaran tersebut, perancang dituntut menetapkan sistem pendinginan, pemanasan dan ventilasi yang tepat agar diperoleh rancangan yang efektif dan efisien.

Saluran udara (*ducting system*) merupakan sistem yang tidak bisa dipisahkan dalam perancangan sistem pengkondisian udara. Sistem ini berfungsi membawa udara yang telah diolah di unit pengolah udara ke ruangan (*supply duct system*) dan membawa kembali udara dari ruangan ke unit pengolah udara (*return duct system*). Saluran udara diterapkan pada sistem pengkondisian udara apabila jarak antara unit pengolah udara dan ruangan cukup jauh. Umumnya penampang saluran udara berbentuk bundar dan segiempat.

Selama perancangan, tidak tertutup kemungkinan dilakukan tinjauan terhadap biaya total sistem. Tujuan tinjauan ini adalah menetapkan ukuran saluran udara yang optimum tanpa meninggalkan aspek fungsinya. Dalam tulisan ini disajikan optimasi rancangan saluran udara untuk penampang persegi.

TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip prosedur perancangan sistem saluran udara adalah membuat susunan (*lay out*) sesederhana dan sesimetri mungkin. Hal ini dimaksudkan untuk menyederhanakan perhitungan, mempermudah estimasi biaya dan mempercepat waktu pemasangan. Terminal udara suplai di ruangan diletakkan sedemikian rupa untuk mendapatkan distribusi udara ruangan yang baik sehingga susunan saluran dibuat mengikuti letak terminal udara (Carrier, 1965).

Ada tiga metoda umum yang dipakai untuk menentukan ukuran saluran udara (Clifford, 1984), yaitu:

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT UMY

- a. Metoda pengurangan kecepatan (*velocity-reduction method*)
- b. Metoda gesekan sama (*equal-friction method*)
- c. Metoda regain statik (*static-regain method*)

a. Metoda Pengurangan Kecepatan

Pada metoda ini, terlebih dahulu ditentukan kecepatan terbesar di saluran utama sisi keluar fan (sesuai standar) dan berangsur-angsur kecepatannya berkurang di sepanjang saluran sesuai dengan debit udara yang ada. Cara yang sama diterapkan pada saluran cabang. Kemudian dihitung penurunan tekanan dan ukuran saluran pada semua aliran.

b. Metoda Gesekan Sama

Ukuran saluran ditetapkan agar kerugian gesekan tiap satuan panjang saluran besarnya sama.

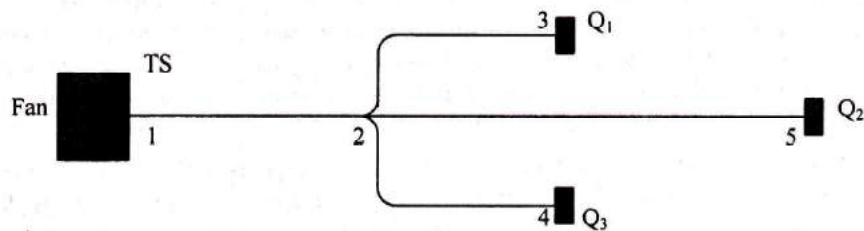
c. Metoda Regain Statik

Dasar metoda regain statik adalah memberi ukuran saluran sedemikian rupa sehingga penambahan tekanan statik (karena pengurangan kecepatan) di tiap cabang atau terminal diimbangi dengan kerugian gesekan pada tiap segmen saluran.

Selain metoda-metoda tersebut di atas, dikenal metoda optimasi rancangan saluran udara. Metoda ini menentukan saluran sekaligus mempertimbangkan faktor biaya. Daya serap biaya terbesar pada sistem saluran udara adalah harga material dan instalasi, isolasi saluran dan energi penggerak fan. Tujuan optimasi adalah meminimumkan biaya saluran secara total yang terdiri dari biaya awal dan biaya operasi (Stoecker, 1989). Unsur-unsur yang berpengaruh secara langsung terhadap biaya total adalah kerugian panas dari saluran ke udara sekitar, ukuran saluran, kerugian gesekan dan tipe sambungan (Carrier, 1965). Stoecker (1989) menyarankan perhitungan optimasi saluran udara cabang banyak (*multibranch*) untuk penampang bundar dengan metoda kalkulus.

PERMASALAHAN

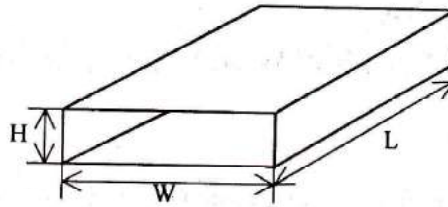
Susunan saluran udara dikenal ada dua tipe pokok yaitu saluran sederhana tanpa cabang dan saluran cabang banyak. Ilustrasi susunan geometrik saluran udara cabang banyak adalah seperti gambar 1.



Gambar 1. Susunan saluran udara cabang banyak.

TS adalah tekanan statik yang diperlukan oleh sisi keluar (*outlet*) fan untuk melawan kerugian gesekan sepanjang saluran baik melewati saluran lurus atau percabangan. Q_1 , Q_2 dan Q_3 adalah debit udara di tiap terminal.

Penampang saluran dipilih segiempat (gambar 2) yang banyak dipakai di lapangan karena mudah dalam pembuatannya. H , W dan L masing-masing tinggi, lebar dan panjang saluran.



Gambar 2. Saluran penampang segiempat.

Untuk mendapatkan ukuran saluran yang ekonomis pada saluran penampang segiempat, perlu dilakukan analisis optimasi rancangan saluran udara dengan memakai metoda kalkulus. Ukuran tersebut meliputi tinggi dan lebar saluran. Langkah ini secara langsung menentukan biaya awal karena terkait dengan volume kebutuhan material.

ANALISIS OPTIMASI RANCANGAN

Biaya awal (B) saluran udara penampang segiempat dinyatakan dengan,

$$B = \sum (\text{harga material}/\text{m}^2)(\pi)(L_{i-j})(D_{e,i-j}) \quad (1a)$$

Indeks i-j menunjukkan segmen saluran. Karena panjang tiap segmen sudah diketahui ketika membuat susunan saluran maka variabel persamaan (1a) adalah diameter ekivalen (D_e) sehingga rumusan di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$B = \sum m_{i-j} D_{e,i-j} \quad (1b)$$

dengan m_{i-j} adalah konstanta gabungan tiap segmen pada persamaan (1a). Diameter ekivalen untuk penampang segiempat menurut Clifford (1984) adalah :

$$D_e = 1,3 (HW)^{0,625}/(H+W)^{0,25} \quad (2)$$

Persamaan (1b) diterapkan pada gambar 1 menghasilkan :

$$B = m_{1-2}D_{e,1-2} + m_{2-3}D_{e,2-3} + m_{2-4}D_{e,2-4} + m_{2-5}D_{e,2-5} \quad (3)$$

Selama udara mengalir dalam saluran, terdapat kerugian tekanan yang dipengaruhi oleh faktor gesekan, panjang dan diameter saluran serta kecepatan dan densitas udara. Besarnya kerugian tekanan pada tiap segmen (Δp_{i-j}) menurut Stoecker dkk (1989) adalah :

$$(\Delta p_{i-j}) = f_{i-j} (L_{i-j} / D_{e,i-j}) (V_{i-j}^2 / 2)\rho \quad (4)$$

dengan ,

f_{i-j} : faktor gesek

V_{i-j} : kecepatan udara tiap segmen, m/det

ρ : densitas udara, kg/m^3

Kecepatan udara dalam saluran dinyatakan :

$$V_{i-j} = (4Q_{i-j})/(\pi D_{e,i-j}^2) \quad (5)$$

Q_{i-j} adalah debit udara yang mengalir di tiap segmen yang telah diketahui. Persamaan (5) disubstitusikan ke persamaan (4) menghasilkan,

$$(\Delta p_{i-j}) = (8/\pi^2)(L_{i-j} / D_{e,i-j}^5) f_{i-j} Q_{i-j}^2 \rho \quad (6)$$

atau :

$$D_{e,i-j} = (8 L_{i-j} f_{i-j} Q^2_{i-j} \rho/\pi^2)^{1/5} (\Delta p_{i-j})^{-1/5} \quad (7a)$$

Dengan mengambil $n_{i-j} = (8 L_{i-j} f_{i-j} Q^2_{i-j} \rho/\pi^2)^{1/5}$ karena L , f , Q dan ρ telah diketahui, persamaan dapat disederhanakan menjadi :

$$D_{e,i-j} = n_{i-j} (\Delta p_{i-j})^{-1/5} \quad (7b)$$

Apabila persamaan (7b) disubstitusikan ke persamaan (1b) dan diekspansikan menurut gambar 2, diperoleh :

$$B = s_{1-2} (\Delta p_{1-2})^{-1/5} + s_{2-3} (\Delta p_{2-3})^{-1/5} + s_{2-4} (\Delta p_{2-4})^{-1/5} + s_{2-5} (\Delta p_{2-5})^{-1/5} \quad (8)$$

dimana $s_{i-j} = m_{i-j} n_{i-j}$. Persamaan (8) disebut fungsi tujuan karena dari fungsi ini penetapan ukuran saluran dengan mempertimbangkan biaya awal.

Persamaan (7b) memberi gambaran bahwa diameter ekuivalen saluran merupakan fungsi penurunan tekanan. Penurunan tekanan dijadikan fungsi batas dimana jumlah kerugian tekanan tiap segmen dari sisi keluar fan sampai ke terminal sama dengan tekanan statik (besarnya telah ditentukan), yaitu :

$$\Sigma (\Delta p_{i-j}) - TS = 0 \quad (9a)$$

atau menurut gambar 1, fungsi batasnya adalah :

$$\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3} - TS = 0$$

$$\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-4} - TS = 0 \quad (9b)$$

$$\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-5} - TS = 0$$

Persamaan (8) dan (9b) dapat diselesaikan dengan memakai metoda *Lagrange multiplier*. Fungsi tujuan ditulis kembali dalam bentuk sederhana sebagai berikut :

$$B = B(\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-3}, \Delta p_{2-4}, \Delta p_{2-5}) \quad (10)$$

dan fungsi batas dinyatakan :

$$\varphi_1(\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-3}) - TS = 0$$

$$\varphi_2(\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-4}) - TS = 0 \quad (11)$$

$$\varphi_3(\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-5}) - TS = 0$$

Nilai optimal Δp dicari dari penyelesaian secara simultan menurut persamaan *Lagrange multiplier* (Jaluria, 1998) sebagai berikut :

$$\nabla B - \sum_{i=1}^3 \lambda_i \nabla \varphi_i = 0 \quad (12)$$

Angka 3 menunjukkan jumlah fungsi batas dan λ_i adalah *Lagrange multiplier* yang merupakan konstanta dimana harganya diketahui pada saat persamaan diselesaikan.

Suku pertama ruas kiri persamaan (12) merupakan gradien dari y ,

$$\nabla B = \partial B/\partial \Delta p_{1-2} i_1 + \partial B/\partial \Delta p_{2-3} i_2 + \partial B/\partial \Delta p_{2-4} i_3 + \partial B/\partial \Delta p_{2-5} i_4 = 0 \quad (13)$$

sedangkan ekspansi suku kedua adalah :

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i \nabla \varphi_i = -\lambda_1((\partial\varphi_1/\partial\Delta p_{1-2})i_1 + (\partial\varphi_1/\partial\Delta p_{2-3})i_2) - \lambda_2((\partial\varphi_2/\partial\Delta p_{1-2})i_1 + (\partial\varphi_2/\partial\Delta p_{2-4})i_3) - \lambda_3((\partial\varphi_3/\partial\Delta p_{1-2})i_1 + (\partial\varphi_3/\partial\Delta p_{2-5})i_4) = 0 \quad (14)$$

i_1, i_2, i_3 dan i_4 adalah unit-unit vektor yang berarti mempunyai arah dan berharga satu.

Harga-harga fungsi skalar pada persamaan (13) dan (14) dikelompokkan berdasar unit vektor. Hasil pengelompokan dengan memperhatikan persamaan (8) dan (9b) adalah :

$$i_1 : \quad - (s_{1-2}/5)(\Delta p_{1-2})^{-1,2} - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 = 0 \quad (15)$$

$$i_2 : \quad - (s_{2-3}/5)(\Delta p_{2-3})^{-1,2} - \lambda_1 = 0 \quad (16)$$

$$i_3 : \quad - (s_{2-4}/5)(\Delta p_{2-4})^{-1,2} - \lambda_2 = 0 \quad (17)$$

$$i_4 : \quad - (s_{2-5}/5)(\Delta p_{2-5})^{-1,2} - \lambda_3 = 0 \quad (18)$$

Dari persamaan (16), (17), dan (18) λ_1, λ_2 dan λ_3 diketahui kemudian disubstitusikan ke persamaan (15). Hasil substitusi diselesaikan secara simultan dengan persamaan (9b). Ada empat buah variabel ($\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-3}, \Delta p_{2-4}, \Delta p_{2-5}$) dan tersedia empat buah persamaan sehingga harga $\Delta p_{1-2}, \Delta p_{2-3}, \Delta p_{2-4}$ dan Δp_{2-5} dapat dicari.

Diameter ekivalen untuk tiap segmen saluran dihitung memakai persamaan (7b) setelah diketahui kerugian tekanannya. Biasanya karena alasan ketersediaan ruangan yang dilalui saluran udara, tinggi saluran (H) ditentukan dari awal. Oleh karena itu berdasar persamaan (2), lebar saluran dapat diketahui. Kemudian informasi biaya awal dihitung dengan persamaan (3).

KESIMPULAN

Berdasar analisis di atas, dapat disimpulkan bahwa perancangan saluran udara perlu memperhatikan aspek ekonomis yaitu menekan biaya awal tanpa mengesampingkan fungsi teknisnya. Optimasi rancangan memakai metoda kalkulus dapat diaplikasikan untuk saluran penampang segiempat. Fungsi tujuan dan fungsi batasnya dapat diselesaikan dengan menerapkan *Lagrange multiplier* sehingga akan diperoleh ukuran saluran yang optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Carrier Air Conditioning Company, 1965, *Handbook of Air Conditioning System Design*, Mc. Graw-Hill Book Company, New York.
- Clifford, G.E., 1984, *Heating Ventilating and Air Conditioning*, Reston Publishing Company Inc., Virginia.
- Jaluria, Y., 1998, *Design and Optimization of Thermal System*, Mc. Graw-Hill International, New York.
- Stoecker, W.F., 1989, *Design of Thermal System*, Third Edition, Mc. Graw-Hill Book Company, New York.
- Stoecker, W.F., Jones, J.W. dan Hara, S., 1989, *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta.