

PERANCANGAN DAN PREDIKSI PERFORMANCE SEBUAH ALAT KONDENSOR INSTALASI PROSES PEMBUATAN ES BALOK

Darmansyah⁽¹⁾ dan Chandrasa Soekardi⁽²⁾

⁽¹⁾ Staf Pengajar Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Banjarmasin

⁽²⁾ Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Pancasila Jakarta

Ringkasan

The energy consumption of a compression refrigeration system depends the ability of the condenser to release heat. Improved condenser design can make a significant contribution to increase the heat removal in the condenser that in turn reduces the energy consumption. This paper presents, firstly the optimization design of a condenser with the objective to estimate the minimum dimension required for a given heat duty, and secondly the prediction of the condenser performance when it is first placed in service. Various design variables such as tube diameter, pitch ratio, tube layout, and fouling factor are considered. Simultance optimization of these variables was tried and 9 design configurations have been experimented. The effect of the design variables and its constraints on the number of tubes required for the condenser are discussed. The results showed that the design conditions that give the minimum number of tube of 187 will be at tube diameter 1.5 inch, tube layout 30o, pitch ratio 1.25, and excess area 1.25. The results of the performance calculations showed that when the condenser is first placed in service its performance is beyond the design conditions. The condenser performance will attain its design conditions when the fouling factor approaches the value that was selected at the design stage.

Kata Kunci : condenser, tube diameter, tube layout, pitch ratio, fouling, excess area

1. PENDAHULUAN

Studi ini dilakukan dengan maksud untuk mencari solusi atas sebuah masalah yang dihadapi oleh alat kondensor yang merupakan salah satu komponen utama instalasi proses pembuatan es balok di salah satu tempat di kota Banjarmasin. Selama pengoperasiannya alat tersebut sering mengalami kegagalan fungsi karena terjadinya kebocoran pada beberapa bagian tube sehingga memberikan kerugian yang sangat besar. Alat tersebut, yang merupakan alat kondensor jenis shell & tube, berfungsi sebagai pelepas energi panas ke udara atmosfer dari instalasi proses pembuatan es balok melalui perantara aliran air pendingin yang mengalir di bagian dalam tube-tube yang ada pada alat tersebut. Sementara itu aliran refrigerant R134A dialirkan dengan laju 4140 kg/h pada bagian shellnya. Alat tersebut bekerja dengan dengan kondisi operasi di mana temperatur rata-rata kondensasi 37 °C dan temperatur rata-rata air pendingin 29 °C.

Beberapa factor yang dapat menjadi penyebab atas terjadinya masalah tersebut di antaranya adalah rendahnya kualitas bahan atau ma-

terial tube, tingginya kecepatan dan tekanan aliran air pendingin di dalam tube, tingginya intensitas vibrasi tube dengan penyangganya. Faktor kecepatan dan tekanan aliran air di dalam tube, serta intensitas vibrasi tube dengan penyangganya adalah merupakan salah satu dampak dari masalah design. Dalam hal ini, pertanyaan yang dapat diajukan untuk dicari solusinya adalah apakah design alat yang selama ini dipergunakan sudah merupakan design yang optimum dan memenuhi persyaratan-persyaratan design yang umum dilakukan para perancang alat yang sama. Efisiensi konsumsi energy pada instalasi mesin pendingin pembuat es akan terjadi apabila alat condenser dapat bekerja secara optimal.

Perancangan dimensi alat kondensor jenis shell & tube bergantung kepada banyak faktor yang saling berpengaruh secara simultan dimana factor-faktor tersebut di antaranya yang utama adalah faktor ukuran tube, jarak antar tube, bentuk susunan tube atau layoutnya, jenis baffle yang dipergunakan dan ukurannya, banyaknya laluan aliran fluida di dalam tube, faktor pengotoran permukaan atau fouling dan lain-lain. Dalam studi ini kajian tidak akan membahas pe-

ngaruh keseluruhan factor-faktor tersebut, tetapi akan dibatasi hanya pada faktor ukuran tube, jarak antar tube, bentuk layoutnya, dan faktor fouling dengan tujuan utama mempelajari seberapa besar pengaruh masing-masing faktor tersebut terhadap perancangan dimensi utama alat kondensor dan mempelajari seperti apa kombinasi dari faktor-faktor tersebut beserta levelnya yang dapat memberikan performance design yang optimum.

2. KONSEP PERANCANGAN

Alat kondensor yang menjadi objek studi di sini akan dirancang ulang dengan batasan design yang sama dengan alat yang ada sebelumnya, yaitu menggunakan fluida refrigerant R134A yang dialirkan dengan laju 4140 kg/h pada bagian shellnya dengan temperatur kondensasi 37 °C. Sementara itu aliran air pendingin dialirkan ke dalam bagian tube dengan temperatur masuk kondensor 29 °C dan temperatur keluar 33 °C. Faktor fouling bagi kedua aliran fluida kerja, sesuai dengan saran para perancang peralatan penukar panas sejenis, ditetapkan sebesar sama dengan 0,000176 m²K/W.

Beban termal yang berkerja pada alat kondensor dapat diestimasi besarnya menggunakan persamaan :

$$Q_h = m_h \cdot (h_i - h_o) \quad (1)$$

Dimana m_h laju aliran massa refrigerant, h_i enthalpi refrigerant masuk alat kondensor, h_o enthalpi refrigerant keluar alat kondensor. Kemudian laju aliran massa air pendingin yang diperlukan oleh alat tersebut dapat diperkirakan besarnya melalui persamaan :

$$Q_c = m_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{co} - T_{ci}) \quad (2)$$

dengan m_c laju aliran massa air pendingin, C_{pc} kapasitas panasnya pada tekanan konstan, T_{co} temperature aliran air keluar kondensor, T_{ci} temperature air masuk kondensor. Sedangkan beda temperatur rata-rata logaritmik yang terjadi pada alat tersebut dapat dievaluasi menggunakan persamaan :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (3)$$

Dalam kasus ini, faktor koreksi untuk beda temperatur tersebut dipilih sama dengan 0,9

Selanjutnya, koefisien perpindahan panas global di mana permukaan masih dalam kondisi bersih dapat diestimasi besarnya melalui persamaan :

$$Q_c = U_c A_c \Delta T_{mc} \quad (4)$$

Sedangkan, koefisien perpindahan panas global yang diperlukan untuk menentukan dimensi utama alat yang dirancang dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U_c} + R_{fi} + R_{fo} \quad (5)$$

Kemudian, luas total permukaan perpindahan panas yang diperlukan oleh alat kondensor dapat dihitung melalui persamaan :

$$Q_f = U_f A_f \Delta T_{mf} \quad (6)$$

Selanjutnya, dimensi utama alat kondensor yaitu diameter shell dan jumlah tube yang diperlukan alat tersebut dapat diestimasi besarnya dengan menggunakan persamaan-persamaan di bawah ini :

$$N_t = 0,785 \left(\frac{CTP}{CL} \right) \left(\frac{D_s^2}{PR^2 d_o^2} \right) \quad (7)$$

Dimana N_t Jumlah pipa, CTP Konstanta jumlah pass, CL Konstanta susunan pipa, PR Pitch ratio, D_s Diameter shell, d_o Diameter luar pipa, dengan :

$$D_s = 0,637 \left[\frac{CL A_o PR^2 d_o}{CTP L} \right]^{0,5} \quad (8)$$

Dimana: A_o luas permukaan luar pipa, L panjang pipa, d_o diameter luar pipa.

Dalam hal ini ukuran tube (panjang dan diameter), jarak antar tube, bentuk lay-out susunan tube, dan jumlah laluan tube di dalam bagian shell terlebih dahulu harus ditetapkan.

Pada tahap selanjutnya, untuk mempelajari seberapa besar pengaruh secara simultan ukuran tube, jarak antar tube, bentuk lay-outnya, dan faktor fouling terhadap rancangan dimensi utama alat kondensor dan untuk mempelajari bagaimana kombinasi dari faktor-faktor tersebut yang dapat memberikan performance design yang optimum maka serangkaian perhitungan perancangan akan dilakukan dengan batasan sebagai berikut. Ukuran tube dipilih 3 ukuran yang berbeda-beda yaitu tube berdiameter luar 1 inch, 1,25 inch, dan tube 1,50 inch. Jarak antar tube dipilih dengan pitch ratio 1,25 ; 1,37 dan 1,50. Faktor fouling direpresentasikan dalam bentuk excess area, dan untuk studi ini dipilih excess area 1,15 ; 1,20 dan 1,25. Kemudian, untuk bentuk dan susunan tube (tube lay-out) dipilih susunan tube 30° dan 45°. Batasan perancangan tersebut disajikan kembali pada table 1 di bawah ini.

Tabel 1. Batasan perancangan

Faktor desain	Level 1	Level 2	Level 3
A : diameter luar tube	1 in	1,25 in	1,5 in
B : Pitch ratio	1,25	1,37	1,50
C : Excess area	1,15	1,20	1,25
D : bentuk susunan tube	30°	45°	

Selanjutnya, ruang lingkup perancangan ditetapkan berdasarkan batasan perancangan tersebut di atas dan dengan menerapkan konsep matrix eksperimen Taguchi.

Tabel 2. Hasil perhitungan perancangan

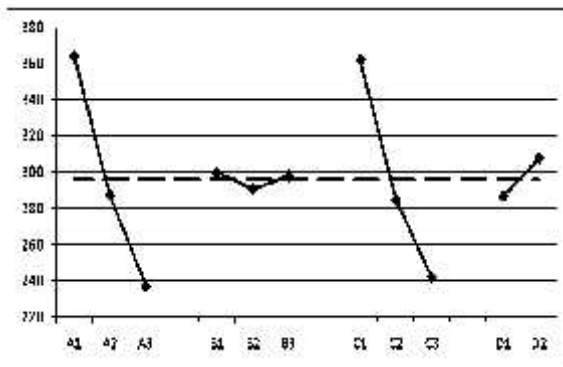
No	Do (m)	PR	EA	CL	A (m ²)	Ds (m)	Nt
1	0.0254	1.25	1.15	0.87	106.4	0.731	430
2	0.0254	1.37	1.20	1.00	83.3	0.760	361
3	0.0254	1.50	1.25	1.00	69.4	0.759	301
4	0.0318	1.25	1.20	0.87	83.3	0.723	269
5	0.0318	1.37	1.25	0.87	69.4	0.723	229
6	0.0318	1.50	1.15	1.00	106.4	1.051	369
7	0.0381	1.25	1.25	1.00	69.4	0.775	201
8	0.0381	1.37	1.15	0.87	106.4	0.981	287
9	0.0381	1.50	1.20	0.87	83.3	0.950	224

Pada tabel 2 tersebut D_o adalah diameter luar tube, PR Pitch Ratio, EA Excess Area, CL konstanta susunan tube, A luas permukaan perpindahan panas total, D_s Diameter shell. N_t jumlah tube yang diperlukan.

Berdasarkan hal tersebut maka rangkaian perhitungan perancangan dengan 9 kondisi design yang berbeda-beda dapat dilakukan. Sebagai karakteristik kualitas adalah dimensi utama alat kondensor, yang dalam hal ini dinyatakan dengan besaran jumlah tube. Hasil perhitungan selengkapnya diberikan pada tabel 2 di atas.

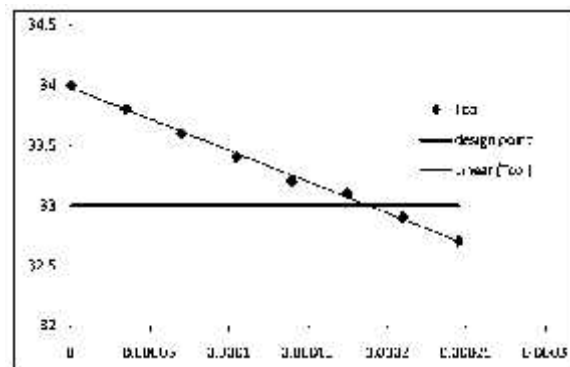
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam studi di sini tujuan utamanya adalah mempelajari seberapa besar pengaruh faktor ukuran tube, jarak antar tube, bentuk layoutnya, dan faktor fouling terhadap dimensi utama alat kondensor dan mempelajari seperti apa kombinasi dari faktor-faktor tersebut beserta levelnya yang dapat memberikan hasil design yang optimum, yaitu dimensi utama yang paling ekonomis.



Gambar 1. Pengaruh rata-rata diameter tube, jarak antar tube, Excess Area, dan bentuk susunan tube terhadap hasil perhitungan jumlah tube alat kondensor.

Dari hasil-hasil perhitungan yang diberikan pada table 2 dapat digambarkan pengaruh rata-rata masing factor dan levelnya terhadap dimensi utama alat kondensor atau jumlah tube yang diperlukan oleh alat kondensor. Dari gambar tersebut dapat dicatat beberapa hal sebagai berikut. Semakin besar ukuran tube yang dipergunakan bagi kasus alat kondensor yang menjadi objek studi di sini maka jumlah tube yang diperlukan semakin sedikit berarti semakin ekonomis. Hal yang sama terjadi pada factor Excess area, di mana Excess Area yang paling besar (EA 1,25) memiliki pengaruh yang lebih baik, karena memberikan jumlah tube yang paling ekonomis. Begitu pula dengan factor bentuk susunan tube 30° lebih baik daripada bentuk susunan tube 45° . Sementara itu, factor jarak antar tube tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap hasil perhitungan jumlah tube. Selanjutnya, dari hasil tersebut di atas dapat diidentifikasi bahwa kondisi design alat kondensor yang paling baik, yaitu yang memberikan dimensi utama atau jumlah tube yang paling ekonomis, adalah apabila alat tersebut dirancang dengan menggunakan tube 1,50 in, jarak antar tube atau pitch ratio 1,37; excess area 1,25 dan bentuk susunan tube 45° yang akan memberikan jumlah tube sebanyak 187 dan diameter shell 0,792 m.

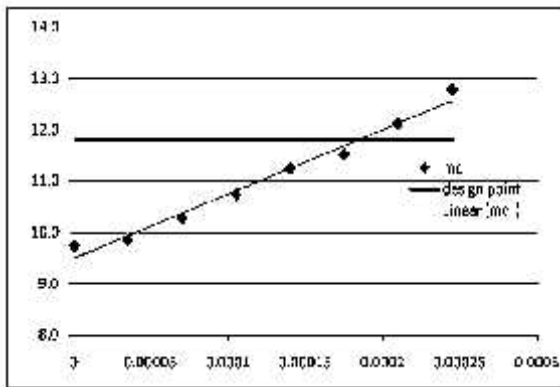


Gambar 2. Prediksi karakteristik temperature aliran air pendingin fungsi bertambahnya factor fouling

Pada tahap selanjutnya, apabila alat kondensor hasil design yang paling optimal tersebut dipasang pada instalasi proses produksi es dan kemudian dioperasikan dengan kondisi operasi beban termal konstan maka perkiraan karakteristik performance temperature aliran air pendingin dan laju aliran massanya fungsi waktu pengoperasiannya diperlihatkan pada gambar 2 dan gambar 3. Pada grafik tersebut waktu pengoperasian diwakili oleh besarnya tahanan termal atau factor pengotoran yang akan terjadi di dalam alat kondensor. Dalam hal ini dianggap bahwa semakin bertambah waktu

pengoperasian alat tersebut maka factor pengotorannya juga semakin membesar.

Hasil prediksi performance tersebut memperlihatkan bahwa pada saat alat kondensor mulai dioperasikan dengan kondisi beban termal yang dipertahankan konstan temperature aliran air pendingin saat keluar kondensor akan berada pada harga yang lebih tinggi daripada harga design pointnya. Hal tersebut disebabkan karena pada saat tersebut kondisi permukaan alat masih dalam keadaan bersih yaitu factor foulingnya nol. Sementara itu alat tersebut didesign dengan menggunakan suatu harga factor fouling tertentu yang konstan. Perbedaan inilah yang menyebabkan alat tersebut saat mulai dioperasikan tidak dapat dioperasikan pada kondisi temperature tepat sebesar harga design pointnya.



Gambar 3. Prediksi karakteristik laju aliran massa air pendingin fungsi bertambahnya factor fouling

Selanjutnya, dengan bertambahnya waktu pengoperasian di mana factor pengotoran permukaan bertambah besar maka temperature aliran air keluar kondensor akan cenderung menurun. Setelah alat tersebut dioperasikan dalam jangka waktu yang lama dan pada saat factor pengotorannya telah mencapai harga yang sama dengan harga design pointnya maka temperature aliran air pendingin akan mencapai harga design pointnya yaitu 33 °C. Setelah itu, apabila waktu pengoperasian ditambah maka temperature air pendingin akan cenderung menurun lebih rendah dari harga design pointnya, karena pengotoran permukaan sudah lebih tinggi daripada yang diperkirakan pada saat design. Kondisi operasi yang demikian mengakibatkan karakteristik laju aliran massa air pendingin juga tidak sama dengan design pointnya.

Pada saat mulai dioperasikan, karena temperature air pendingin lebih tinggi maka laju aliran massa air pendingin harus dioperasikan pada harga yang lebih rendah daripada harga design pointnya. Kemudian dengan berjalannya

waktu pengoperasian, di mana factor foulingnya bertambah besar, maka laju aliran massa air pendingin harus dinaikkan secara bertahap mengikuti kenaikan waktu daripada pengoperasiannya.

Dalam praktek, kondisi aliran air pendingin dengan temperature yang lebih tinggi dan laju aliran yang lebih rendah daripada harga design pointnya tentu saja kurang menguntungkan karena dapat menyebabkan deposit pengotoran permukaan tumbuh lebih cepat daripada seharusnya. Hal tersebut terutama akibat dari kondisi kecepatan aliran yang lebih rendah dan temperature rata-rata aliran air pendingin yang lebih tinggi dari yang seharusnya yang memudahkan terjadinya percepatan pembentukan deposit di permukaan. Apabila hal tersebut berlangsung terus menerus maka biaya maintenance alat dapat menjadi lebih tinggi. Hal inilah yang musti mendapatkan perhatian secara khusus, terutama oleh para operator dalam melakukan treatment fluida air pendingin pada saat alat kondensor hasil design tersebut mulai dioperasikan pada instalasi industri.

4. PENUTUP

Kesimpulan dan Saran

Rangkaian optimasi design sebuah alat kondensor jenis shell & tube instalasi proses pembuatan es telah dilakukan untuk mencari solusi terhadap masalah yang dihadapi oleh alat tersebut yang mana sering mengalami kegagalan fungsi karena terjadinya kebocoran pada beberapa bagian tube. Dari telah terhadap factor-faktor yang menjadi penyebab terjadinya masalah, faktor kecepatan dan tekanan aliran air di dalam tube, serta intensitas vibrasi tube dengan penyangganya disinyalir memiliki peranan yang sangat penting dalam masalah ini sehingga pertanyaan yang ingin dicari solusinya adalah apakah design alat tersebut sudah merupakan design yang optimum dan memenuhi persyaratan-persyaratan design yang umum dilakukan.

Analisis pengaruh ukuran tube, jarak antar tube, bentuk susunan tube, dan faktor fouling dan identifikasi kombinasi dari factor-faktor tersebut beserta levelnya yang dapat memberikan performance design yang optimum telah dilakukan. Dari 3 ukuran tube yang dicoba, ukuran tube 1,50 in memberikan pengaruh terbaik terhadap jumlah tube karena jumlah tubenya yang paling sedikit sehingga paling ekonomis. Excess Area yang paling besar memberikan pengaruh yang lebih baik. Begitu pula, bentuk susunan tube 30° juga lebih baik daripada bentuk susunan tube 45°. Dalam studi ini factor jarak antar tube tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan.

Design optimum, yaitu yang memberikan dimensi utama atau jumlah tube yang paling ekonomis, adalah apabila alat kondensor dirancang dengan menggunakan tube ukuran 1,50 in, jarak antar tube atau pitch ratio 1,37 ; excess area 1,25 dan bentuk susunan tube 30° yang akan memberikan jumlah tube sebanyak 187 dan diameter shell 0,792 m. Hasil perhitungan prediksi performance alat hasil perancangan memberikan petunjuk akan pentingnya dilakukannya treatment fluida kerja, terutama pada fluida air pendingin pada saat alat kondensor mulai dioperasikan pada instalasi industri.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Kakac, S., (1987), *"Boilers, Evaporators, and Condensers"*, chapter 4, John Wiley & Sons, New York,.
2. El-Wakil, M. M, (1985). *Power Plant Technology*, Singapore, McGraw-Hill Book Co..
3. Epstein N., (1988), *" Particulate Fouling of Heat Transfer Surfaces : Mechanisms and Models*, L .F Melo et al. Fouling Science and Technology, Kluwer,.
4. Garrett-Price, et al., (1985) *"Fouling of Heat Exchanger: Characteristics, Costs, Prevention, Control, and Removal"*, Noyes, Park Ridge, New York, 1985.
5. Marner W.J., (1990), *"Progress in Gas Side Fouling of heat Transfer Surfaces"*, Appl. Mech. Rev, Vol. 43,.
6. Tubular Exchanger Manufacturers Association, (1988), *"Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, TEMA"*, 7th Ed., New York, NY.
7. P.k. Nag, (2002), *Power Plant Engineering*, Second Edition, International edition, Mc Graw Hill, Singapore,
8. Cengel A. Yunus & Boles.A. Michael, (2007), *Thermodynamics, An Engineering Approach*, Sixth Edition, Mc Graw Hill, Singapore
9. Kreith Frank & Black. Z. William, (2003), *Basic Heat Transfer*, Harper & Row, Publisher, New York,
10. Sadik Kakac & Hongtan Liu. (2002), *Heat Exchangers, selection, rating and termal design*, second edition,