

Pengaruh Drop Tekanan Saluran Buang terhadap Kinerja Mesin Tata Udara

Andriyanto Setyawan^{1,*}, Prasetyo²

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Bandung, Indonesia

*andriyanto@polban.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini dilakukan simulasi pengaruh rugi tekanan saluran buang pada kinerja AC Split dengan daya kompresor nominal 1.5 hp dengan menggunakan refrigeran R410a. Kinerja yang diamati adalah koefisien kinerja (coefficient of performance), kebutuhan kapasitas kondenser, kerja kompresor, dan rasio kompresi. Secara umum, drop tekanan saluran buang kompresor memberikan pengaruh buruk terhadap kinerja mesin tata udara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa drop tekanan saluran buang kompresor sebesar 1 bar menyebabkan kenaikan temperatur discharge sebesar 2,6°C, kenaikan rasio kompresi sebesar 12%, kenaikan kebutuhan kapasitas kondenser sebesar 3,25%, kenaikan kerja kompresor sebesar 3,24%, dan penurunan koefisien kinerja mesin sebesar 7%.

Kata kunci : Tekanan saluran buang, COP, kapasitas kondenser, kerja kompresor, rasio kompresi

Pendahuluan

Pada suatu sistem refrigerasi, tekanan dan rugi tekanan pada pemipaan refrigeran, kondenser dan evaporator berpengaruh sangat penting pada kinerja mesin. Pada beban rendah dan tekanan kondenser tinggi, kerja mesin refrigerasi akan terganggu [1]. Penurunan COP (coefficient of performance atau koefisien kinerja) terjadi pada saat mesin bekerja pada lingkungan bertemperatur tinggi [2]. Koefisien kinerja turun karena pada saat temperatur lingkungan tinggi, tekanan kondensasi juga tinggi, sehingga kerja kompresor meningkat dan berakibat menurunkan COP. Penurunan kinerja mesin refrigerasi juga dipengaruhi oleh desain sistem (ukuran kondenser, pengisian refrigeran, alat ekspansi). Pengujian dengan R22 dan R407C [3] juga menunjukkan bahwa COP turun saat temperatur dan tekanan kondensasi tinggi.

Rugi tekanan refrigeran pada keluaran kondenser atau liquid line dapat menyebabkan turunnya beda tekanan pada alat ekspansi. Akibatnya, laju aliran massa refrigeran akan turun. Karena kapasitas pendinginan sebanding dengan laju aliran massa refrigeran, maka kapasitas pendinginan juga akan menurun.

Pada saluran buang, rugi tekanan dapat mengakibatkan tingginya tekanan pada keluaran kompresor. Hal ini akan menyebabkan tingginya rasio kompresi pada kompresor. Tingginya rasio kompresi menyebabkan tingginya kerja kompresor sehingga menurunkan COP dan efisiensi energi. Rugi tekanan tersebut juga dapat meningkatkan tekanan dan temperatur kondensasi sehingga menurunkan efisiensi mesin refrigerasi. Pengaruh tekanan dan temperatur kondensasi pada kondenser terhadap laju perpindahan kalor telah dilaporkan. Dengan variasi temperatur kondensasi 25°C, 30°C, 40°C, dan 50°C,

terdapat penurunan laju perpindahan kalor pada kondenser jika temperatur kondensasi naik. Penurunan laju perpindahan kalor semakin signifikan jika fraksi uap refrigeran meningkat. Penurunan efisiensi energi pada R410A lebih besar dibandingkan dengan penurunan pada R22 [4].

Rugi tekanan pada koil kondenser juga menyebabkan naiknya kerja kompresor untuk mengimbangi rugi tekanan pada kondenser [5]. Karena pemipaan kondenser lebih panjang dibandingkan dengan saluran buang dan liquid line, maka rugi tekanan pada kondenser akan lebih besar. Hal ini masih ditambah lagi dengan adanya belokan berbentuk U (U-bend) yang jumlahnya bisa mencapai puluhan hingga ratusan untuk satu unit kondenser. Akibatnya, kerugian energi juga akan besar.

Selain mengakibatkan kenaikan konsumsi daya dan penurunan kinerja, rugi tekanan juga berkaitan erat dengan pola aliran fluida dalam pemipaan [6,7,8]. Pola aliran ini selanjutnya akan mempengaruhi laju perpindahan kalor pada kondenser dan evaporator.

Mengingat besarnya potensi kerugian yang diakibatkan oleh rugi tekanan pada saluran buang, liquid line, dan koil kondenser, maka desain ketiga bagian sistem refrigerasi ini harus dilakukan dengan baik agar sesuai dengan kapasitas komponen-komponen refrigerasi yang lain. Studi dan penelitian tentang rugi tekanan ini penting untuk dilakukan guna meminimalkan kerugian energi akibat kehilangan tekanan. Selanjutnya, studi tentang kaitan antara gradien tekanan dengan pola aliran juga penting karena berkaitan dengan laju perpindahan kalor pada kondenser dan evaporator.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh rugi tekanan saluran buang kompresor terhadap kinerja suatu mesin tata udara. Penelitian ini akan memberikan gambaran bagaimana rugi tekanan buang kompresor dapat

mempengaruhi kapasitas dan konsumsi daya. Pada tahap awal, penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak.

Tinjauan Pustaka

Selain mengalami kompresi pada kompresor dan ekspansi pada kapiler atau alat ekspansi, refrigeran pada suatu sistem refrigerasi juga mengalami perubahan fasa, baik dari uap menjadi cair maupun cair menjadi uap. Saat memasuki kompresor, refrigeran haruslah berfasa uap murni agar tidak merusak kompresor. Keluar dari kompresor, refrigeran memiliki fasa uap dengan tekanan dan temperatur tinggi. Pada kondenser, refrigeran mengalami pendinginan dan kondensasi pada tekanan konstan, sehingga secara bertahap fasa refrigeran berubah dari uap murni menjadi cair murni di keluaran kondenser pada tekanan tinggi dan temperatur yang masih tinggi. Di dalam kondenser, refrigeran berupa campuran antara uap dengan cair. Semakin mendekati keluaran kondenser, fasa cairnya semakin banyak. Setelah mengalami ekspansi, fasa refrigeran berupa campuran dengan fraksi cairan yang lebih dominan, dengan tekanan dan temperatur yang rendah. Pada evaporator, refrigeran mengalami penguapan/evaporasi pada tekanan konstan sehingga pada keluaran evaporator refrigeran akan berfasa uap murni dengan tekanan dan temperatur rendah. Dengan fasa yang berubah-ubah, maka karakteristik rugi tekanan yang dialami oleh refrigeran akan berubah-ubah pula.

Pada aliran dua fasa, seperti halnya terjadi pada kondenser dan evaporator, tidak ada formula yang pasti untuk menentukan rugi tekanan pada pemipaan. Semua perhitungan didasarkan pada hasil percobaan dan hingga saat ini masih belum disepakati mana formula yang paling benar untuk berbagai kondisi aliran. Korelasi drop tekanan yang populer untuk aliran dua fase adalah

$$\begin{aligned} \Delta P_{TP} &= 4f_{TP} \frac{L}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_G v_G^2 \right), \text{ untuk } v_G \\ &\gg v_i. \end{aligned} \quad (1)$$

ΔP_{TP} adalah rugi tekanan dua fasa, f_{TP} adalah faktor gesekan dua fasa, ρ_G adalah massa jenis gas, v_G dan v_i adalah kecepatan gas dan kecepatan pada antarmuka gas dan cairan.

Jika v_i tidak dapat diabaikan, maka berlaku hubungan

$$\begin{aligned} (1 - \epsilon_L) \Delta P_{TP} &= 4f_{TP} \frac{L}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_G v_G^2 \right) \\ &- 4\theta f_i \frac{L}{D} \left(\frac{1}{2} \rho_G (2v_G v_i - v_i^2) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

di mana θ adalah fraksi dinding pipa yang terbasahi dan f_i adalah faktor gesekan pada antarmuka cairan-gas. Faktor gesekan dapat dicari dengan

$$f_{TP} = (1 - \theta) f_G + \theta f_i \quad (3)$$

Faktor gesekan untuk fasa gas ditentukan dengan

$$f_G = \frac{0.07725}{\left[\log_{10} \left(\frac{Re_G}{7} \right) \right]^2} \quad (4)$$

di mana Re_G adalah bilangan Reynolds untuk gas. Selanjutnya, faktor gesekan pada antarmuka dicari dengan

$$f_i = \frac{0.0625}{\left[\log_{10} \left(\frac{15}{Re_G} + \frac{k}{3.715D} \right) \right]^2} \quad (5)$$

Besaran k/D adalah kekasaran relatif dan k dinyatakan dengan $k=2.3\epsilon_L D/40$ dan ϵ_L adalah fraksi cairan pada aliran dua fasa.

Pada beberapa dekade terakhir, prediksi rugi tekanan pada aliran dua fasa banyak didasarkan pada parameter Martinelli, X^2 , [9,10,11,12]

$$X^2 = \frac{dP_L/dz}{dP_G/dz} \quad (6)$$

dP_L/dz dan dP_G/dz menyatakan rugi tekanan jika hanya cairan saja atau gas saja yang mengalir pada pipa sepanjang sumbu aksial z . Selanjutnya, pendekatan yang digunakan adalah dengan menggunakan

pengali gesekan dua-fasa atau *two-phase friction multiplier*, ϕ^2

$$\phi_L^2 = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{TP} / \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_L \quad (7)$$

$$\phi_G^2 = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_{TP} / \left(\frac{\Delta P}{\Delta L} \right)_G \quad (8)$$

Dengan mengetahui parameter *two-phase friction multiplier*, maka rugi tekanan dari sisi gas maupun cairan dapat dihitung.

Hingga kini telah ada beberapa korelasi untuk memprediksi rugi tekanan pada aliran dua fasa. Rugi tekanan pada pipa lurus dan belokan U pada R410A telah berhasil diprediksi. Model untuk memprediksi rugi tekanan pada berbagai refrigeran juga telah diajukan [13]. Korelasi prediksi rugi tekanan untuk kondensasi pada pipa dan model matematika untuk prediksi rugi tekanan pada gravitasi mikro juga telah diajukan [14].

Secara umum, rugi tekanan pada berbagai posisi pemipaan pada sistem refrigerasi akan menyebabkan naiknya kerja kompresor. Simulasi pada refrigeran R410A memberikan hasil bahwa setiap rugi tekanan sebesar 1 bar dapat menyebabkan kenaikan kerja kompresor kurang lebih sebesar 14%. Selanjutnya, setiap rugi tekanan sebesar 1 bar pada kondenser dapat menyebabkan penurunan COP sebesar 13.1%. Jadi jelaslah bahwa rugi tekanan pada kondenser harus diupayakan sekecil mungkin.

Metodologi

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan perangkat lunak Coolpack dari Department of Energy Engineering, Technical University of Denmark. Simulasi dilakukan pada mesin tata udara dengan menggunakan refrigeran R410a dengan kapasitas nominal kompresor 1,5 hp. Pada simulasi ini rugi tekanan saluran buang (discharge line) diubah-ubah mulai dari 0 bar hingga 3 bar dengan kenaikan 0,25 bar. Nilai efisiensi isentropik yang digunakan adalah 0.6, sebagaimana yang umum

dijumpai pada mesin tata udara kapasitas kecil sampai menengah. Besaran-besaran yang diperoleh dari simulasi adalah: perubahan temperatur saluran buang, temperatur refrigeran masuk ke kondenser, efek refrigerasi, pembuangan kalor spesifik pada kondenser, kerja kompresor spesifik, koefisien kinerja, kapasitas pendinginan, kapasitas kondenser yang dibutuhkan, kerja kompresor, dan rasio tekanan.

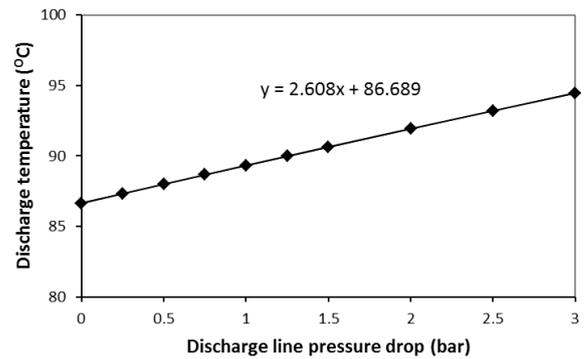
Pengaruh langsung drop tekanan saluran buang kompresor terhadap temperatur saluran buang adalah bagian pertama yang dianalisis. Selanjutnya, dilakukan pula analisis pada kebutuhan kapasitas kondenser, kerja kompresor, dan rasio tekanan pada saluran buang dan saluran isap kompresor.

Tingkat pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap besaran-besaran di atas juga dianalisis dengan menggunakan trendline. Dengan cara ini, tingkat atau persentase pengaruh variasi drop tekanan saluran buang terhadap kinerja mesin tata udara dapat ditentukan.

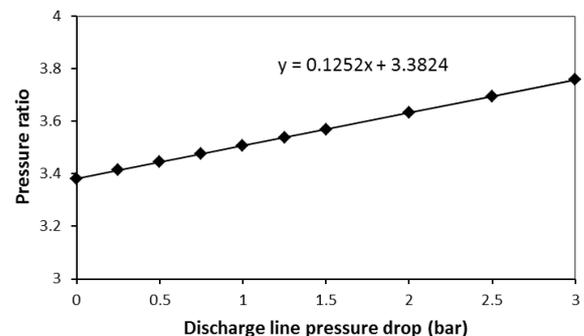
Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rugi tekanan pada saluran buang kompresor menyebabkan naiknya temperatur pada saluran buang (discharge temperature). Sebagaimana ditunjukkan pada trendline pada Gambar 1, drop tekanan pada saluran buang sebesar 1 bar akan menyebabkan terjadinya kenaikan temperatur saluran buang sebesar 2,6°C.

Akibat terjadinya drop tekanan pada saluran buang, rasio antara tekanan pada saluran buang dengan tekanan pada saluran isap akan meningkat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Setiap drop tekanan sebesar 1 bar akan menaikkan rasio tekanan sebesar 12%. Hal ini tentu akan memperberat kerja kompresor.

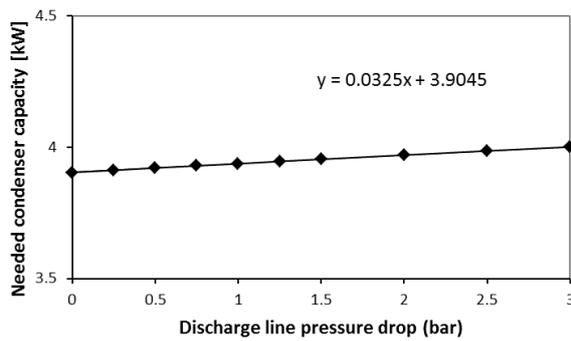


Gambar 1. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap temperatur saluran buang.



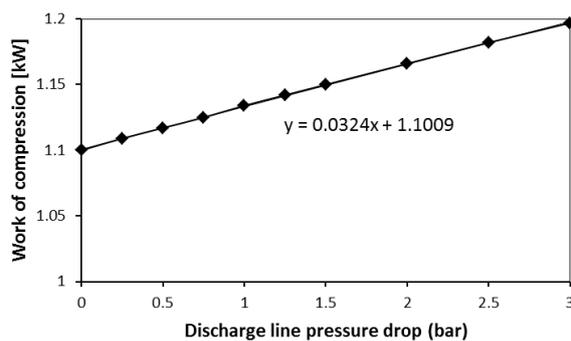
Gambar 2. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap rasio tekanan kompresor.

Pada kondisi di mana terjadi drop tekanan pada saluran buang, kapasitas pendinginan cenderung menurun. Agar kapasitas pendinginan konstan, maka kapasitas kondenser yang dibutuhkan akan lebih besar. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap kebutuhan kapasitas kondenser untuk mempertahankan kapasitas pendinginan konstan diberikan pada Gambar 3. Trendline pada gambar tersebut menunjukkan bahwa setiap terjadi drop tekanan pada saluran buang sebesar 1 bar, maka dibutuhkan kenaikan kapasitas kondenser sebesar 3,25% untuk mempertahankan kapasitas pendinginan. Jika kapasitas kondenser tidak dinaikkan, maka kapasitas pendinginan akan mengalami penurunan.



Gambar 3. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap kebutuhan kapasitas kondenser.

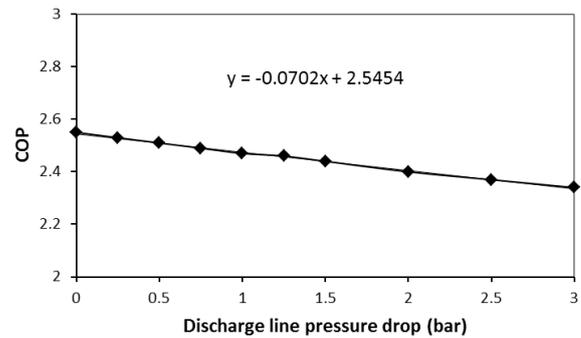
Kenaikan tekanan buang kompresor menyebabkan pula kenaikan pada kerja kompresor. Simulasi pada mesin tata udara dengan kapasitas kompresor nominal 1.5 hp menunjukkan bahwa tanpa drop tekanan pada saluran buang, kerja kompresor yang dibutuhkan adalah sebesar 1,1 kW. Jika pada saluran buang terjadi drop tekanan sebesar 3 bar, maka kerja kompresor naik menjadi 1,2 kW, atau mengalami kenaikan sebesar 9,72%, atau 3,24% untuk setiap 1 bar drop tekanan saluran buang. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap kerja kompresor diberikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap kerja kompresi.

Koefisien kinerja (coefficient of performance, COP), yang merupakan perbandingan antara efek pendinginan dengan kerja kompresi, juga dipengaruhi

oleh tekanan saluran buang kompresor. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, COP akan turun dari 2,55 menjadi 2,34 saat terjadi drop tekanan sebesar 3 bar. Ini berarti setiap 1 bar drop tekanan akan menyebabkan terjadinya penurunan COP sebesar 7%.



Gambar 5. Pengaruh drop tekanan saluran buang terhadap COP.

Kesimpulan

Secara umum dapat dikatakan bahwa terjadinya drop tekanan pada saluran buang kondenser akan menaikkan temperatur refrigeran pada saluran buang, menaikkan rasio kompresi pada kompresor, menaikkan kebutuhan kapasitas kondenser, menaikkan kerja kompresor, dan menurunkan koefisien kinerja.

Setiap drop tekanan 1 bar akan mengakibatkan kenaikan temperatur discharge sebesar 2,6°C, kenaikan rasio kompresi sebesar 12%, kenaikan kebutuhan kapasitas kondenser sebesar 3,25%, kenaikan kerja kompresor sebesar 3,24%, dan penurunan koefisien kinerja mesin sebesar 7%.

Daftar Pustaka

- [1]. Green, R. H., Technology, E. A. Vinnicombe, O. A., and Ibrahim, G. A., Refrigeration Control with Varying Condensing Pressures (1992). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 192
- [2]. Motta, S.Y, Domanski, P.A. (2001). Impact of elevated ambient temperature on capacity and energy input to a vapor compression

- system – Literature Review. Report for ARTI 21-CR Research Project.
- [3]. Vaisman, I. B., Computational Comparison of R22 and R407C Air Conditioners with Rotary Vane Compressors (1998). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 382
- [4]. Payne, W.V. and P. A. Domanski (2003). A Comparison of an R22 and an R410A Air Conditioner Operating at High Ambient Temperatures. Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute.
- [5]. Love, R. J., D. J. Cleland, I. Merts, B. Eaton (2005). Optimum compressor discharge pressure set point for condensers. Ecolibrium Forum, Centre for Postharvest and Refrigeration Research, Massey University, Palmerston North.
- [6]. Wongwises, S., & Pipathattakul, M. (2006). Flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase gas-liquid flow in an inclined narrow annular channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30(4), 345–354.
- [7]. Saisorn, S., & Wongwises, S. (2008). Flow pattern, void fraction and pressure drop of two-phase air–water flow in a horizontal circular micro-channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(3), 748–760.
- [8]. Shedd, T. A. (2012). Void fraction and pressure drop measurements for refrigerant R410a flows in small diameter tubes. AHRTI Report No. 20110-01, Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Technology Institute, Inc.
- [9]. Chen, I. Y., Yang, K.-S., Chang, Y.-J., & Wang, C.-C. (2001). Two-phase pressure drop of air-water and R410A in small horizontal tubes. Brief Communication, *Int J. Multiphase Flow*, 27, 1291-1299.
- [10]. Hlaing, N. D., Sirivat, A., Siemanond, K., & Wilkes, J. O. (2007). Vertical two-phase flow regimes and pressure gradients : Effect of viscosity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 567–577.
- [11]. Dalkilic, A. S., Agra, O., Teke, I., & Wongwises, S. (2010). International Journal of Heat and Mass Transfer Comparison of frictional pressure drop models during annular flow condensation of R600a in a horizontal tube at low mass flux and of R134a in a vertical tube at high mass flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9-10), 2052–2064.
- [12]. Fang, X., Zhang, H., Xu, Y., & Su, X. (2013). Correlations for two-phase friction pressure drop under microgravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1-2), 594–605.
- [13]. Balcilara, A.S. Dalkilic, O. Agra, S.O. Atayilmaz, S. Wongwises, A correlation development for predicting the pressure drop of various refrigerants during condensation and evaporation in horizontal smooth and micro-fin tubes, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39 (2012) 937–944
- [14]. Xu, Y., & Fang, X. (2013). A new correlation of two-phase frictional pressure drop for condensing flow in pipes. *Nuclear Engineering and Design*, 263, 87–96.