

Analisis Pengaruh Pipa Kapiler yang Dililitkan pada *Line Suction* Terhadap Performansi Mesin Pendingin¹⁾

Ekadewi Anggraini Handoyo

Dosen Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Agus Lukito

Alumnus Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Mesin pendingin yang kebanyakan bekerja dengan dasar siklus pendingin kompresi uap membutuhkan energi *input* (umumnya listrik) dalam jumlah cukup besar. Dalam artikel ini dibahas pengaruh usaha melilitkan pipa kapiler pada *line suction* terhadap performansi suatu mesin pendingin, dalam eksperimen ini digunakan *freezer*. Performansi yang diamati adalah COP dan waktu pendinginan. Waktu pendinginan didapat dari waktu untuk menurunkan 1C° air garam dari 6°C menjadi 5°C dan seterusnya hingga -3°C.

Dari eksperimen yang dilakukan didapat bahwa pipa kapiler yang dililitkan pada *line suction* dapat meningkatkan COP *freezer* sedang waktu pendinginan tidak banyak berubah.

Kata kunci: siklus pendingin, *line suction*, pipa kapiler.

Abstract

A refrigerator mostly operates on vapor-compression refrigeration cycle needs a lot of energy (usually electricity) as an input. An attempt to wire the capillary tube to line suction will be analyzed in this article to find its effect to the refrigerator's performance. The experiment is carried on a freezer. The performance analyzed is its COP and time needed to cool down 1C° brine from 6°C to 5°C and so on until -3°C.

From the experiment, it is found that wiring capillary tube could increase the freezer's COP, yet the time needed to cool the brine is not much effected.

Keywords: refrigeration cycle, *line suction*, capillary tube.

1. Pendahuluan

Pada dewasa ini khususnya di perkotaan, mesin pendingin merupakan suatu peralatan yang dapat dijumpai pada hampir setiap perkantoran, gedung-gedung dan rumah tangga. Mesin pendingin dapat berfungsi sebagai *refrigerator*, *freezer*, *chiller* baik untuk kebutuhan *Air Conditioning* maupun untuk penunjang proses produksi. Gedung perkantoran dan pusat perbelanjaan yang biasanya merupakan gedung bertingkat yang tidak ber-jendela sangat memerlukan mesin pendingin untuk mengkondisikan udara dalam gedung.

Semua mesin pendingin bekerja berdasarkan prinsip Hukum Termodinamika II yang dinyatakan oleh Clausius, yaitu bahwa tidak ada suatu peralatan yang bekerja secara siklus yang dapat memindahkan panas dari benda bertemperatur rendah ke benda bertemperatur tinggi dengan sendirinya, selalu diperlukan *input* energi dari luar. *Input* energi ini biasanya berupa energi listrik.

Mengingat semakin mahalnya harga listrik dan mengingat semakin menipisnya sumber energi tak terbarui yang tersedia, maka diperlukan usaha untuk menghemat energi dengan meningkatkan efisiensi kerja peralatan khususnya dalam hal ini mesin pendingin.

Saat ini, kebanyakan mesin pendingin bekerja berdasarkan siklus pendingin kompresi uap (*vapor compression refrigeration cycle*). Pada siklus pendingin ini terdapat 4 komponen utama yaitu: *evaporator*, kompresor, kondensor

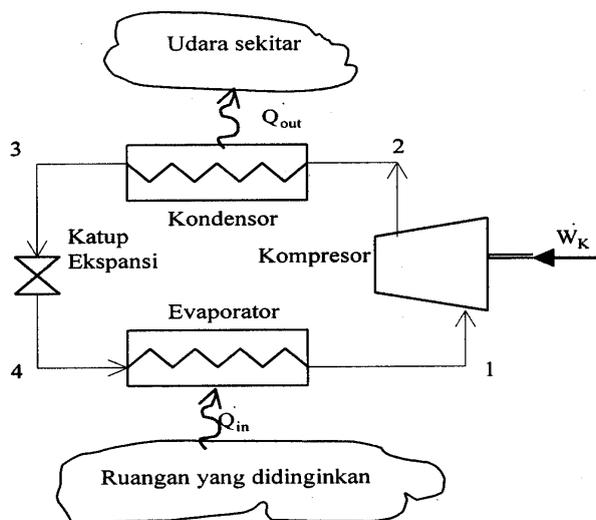
Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 5 Nomor 1 April 2003.

¹⁾ Penelitian dilakukan bersama Alm. Dr. Ir. Raharjo Tirtoadmodjo, D.E.A.

dan alat ekspansi seperti dapat dilihat pada gambar 1. Saluran keluar *evaporator* yang akan masuk ke kompresor disebut sebagai *line suction*. *Refrigerant* (orang sering menyebut freon) saat mengalir dalam *evaporator* dan *line suction* berada pada temperatur rendah (biasanya lebih rendah kira-kira 10 - 15°C dari temperatur ruangan yang didinginkan). Setelah ke luar dari kompresor, *refrigerant* mengalir dalam kondensor dengan temperatur lebih tinggi kira-kira 10 - 15°C dari temperatur udara sekitar. Dengan demikian *refrigerant* ke luar kondensor dan masuk alat ekspansi (biasanya pipa kapiler) pada temperatur yang lebih tinggi dari pada di *line suction*. Kondisi ini membuat beberapa orang tertarik mencoba melilitkan pipa kapiler ke *line suction*. Artikel ini membahas bagaimana pengaruh usaha melilitkan pipa kapiler ke *line suction* terhadap performansi mesin pendingin kompresi uap, dalam hal ini COP dan waktu pendinginan beban.

2. Teori Dasar

Sistem pendingin kompresi uap yang beroperasi secara *steady* dapat diilustrasikan seperti pada gambar 1. Pada gambar tersebut terlihat kerja utama yang berupa *input* dari luar dan perpindahan panas utama yang berasal dari ruangan yang didinginkan dan yang ke luar ke udara sekitar. Perubahan energi kinetik dan energi potensial saat menganalisa tiap komponen diabaikan, karena besar perubahan entalpi saat melalui komponen tersebut jauh lebih besar disbanding perubahan energi kinetik dan potensial.



Gambar 1. Komponen dari System Pendingin Kompresi Uap.

Saat *refrigerant* mengalir melalui *evaporator*, perpindahan panas dari ruangan yang didinginkan menyebabkan *refrigerant* menguap. Dengan mengambil *refrigerant* pada *evaporator* sebagai volume atur, dari keseimbangan massa dan Hukum Termodinamika I didapat perpindahan panas per satuan massa *refrigerant* yang mengalir sebesar:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{m} = h_1 - h_4 \quad (1)$$

Laju perpindahan panas \dot{Q}_{in} disebut kapasitas pendinginan atau dampak refrigerasi. Dalam system satuan SI, kapasitas dinyatakan dalam kWatt. Dalam system satuan English, kapasitas dinyatakan dalam Btu/jam. Satuan lain yang sering dipakai adalah *ton of refrigeration*, yang sama dengan 200 Btu/menit atau 211 kJ/menit.

Refrigerant meninggalkan *evaporator* kemudian dikompresi hingga tekanan dan temperatur tinggi oleh kompresor. Diasumsikan tidak ada perpindahan panas dari dan ke kompresor. Dengan menerapkan keseimbangan massa dan laju energi (Hukum Termodinamika I) pada volume atur yang melingkupi kompresor, didapat *power input* per satuan massa *refrigerant* yang mengalir sebesar:

$$\frac{\dot{W}_k}{m} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

Kemudian, *refrigerant* mengalir melalui kondensor, dimana *refrigerant* mengembun dan memberikan panas ke udara sekitar yang lebih rendah temperaturnya. Untuk volume atur melingkupi *refrigerant* di kondensor, laju perpindahan panas dari *refrigerant* per satuan massa *refrigerant* yang mengalir adalah:

$$\frac{\dot{Q}_{out}}{m} = h_2 - h_3 \quad (3)$$

Akhirnya, *refrigerant* pada state 3 masuk katup ekspansi (bisa berupa pipa kapiler) dan berekspansi ke tekanan *evaporator*. Proses ini biasanya dimodelkan sebagai proses throttling yang menghasilkan:

$$h_4 = h_3 \quad (4)$$

Tekanan *refrigerant* turun dalam ekspansi yang ireversibel dan dibarengi dengan adanya kenaikan entropy jenis. *Refrigerant* keluar katup ekspansi pada state 4 yang berupa fase campuran uap-cair.

Dalam system pendingin kompresi uap, *power input* netto sama dengan *power* untuk menggerakkan kompresor, karena katup ekspansi tidak memerlukan dan tidak menghasilkan *power*. Besaran yang menunjukkan unjuk kerja mesin pendingin adalah *Coefficient of Performance* (COP) didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas pendinginan dengan *power input*. Dengan menggunakan kuantitas seperti di atas,

$$COP = \frac{Q_{in}/\dot{m}}{\dot{W}_K/\dot{m}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

3. Eksperimen

Eksperimen dilakukan pada *freezer* yang dirancang oleh Dewono dan Kosala Mahinda²⁾ dengan spesifikasi:

- Kompresor tipe *hermetic*:
1 silinder *reciprocating*, nominal speed: 48 rps, dengan *bore* 21,9 mm, *stroke*: 11,8 mm dan *displacement* 4,48 cm³.
- Kondensor:
Terbuat dari tembaga dengan diameter 3/16" dan panjang 34,96 m.
- *Evaporator*:
Terbuat dari aluminium dengan diameter 1/4" dan panjang 5,7 m.
- Pipa Kapiler:
Terbuat dari tembaga dengan diamter 0,031" dan panjang 2,582 m.
Refrigerant yang digunakan adalah R-406A (sebagai pengganti R-12).

Eksperimen dilakukan di dalam ruangan yang tidak dikondisikan di Surabaya. Beban pendinginan dalam ruang *freezer* dibuat seragam selama eksperimen, yaitu berupa pendinginan air garam yang merupakan campuran dari 500 gram air dan 60 gram garam. Penggunaan air garam 12% dimaksudkan agar tidak terjadi proses pembekuan, karena diketahui bahwa temperatur beku air garam 12% adalah 17,5°F (-8,05°C).

Sebelum eksperimen dilakukan, semua alat ukur yaitu termometer dan *pressure gage* dikalibrasi.

- Kalibrasi Termometer:
Keenam termometer digunakan untuk mengukur es dan menunjukkan angka 0 ± 0,2°C, kemudian digunakan untuk mengukur air hangat dan semuanya menunjukkan angka yang sama yaitu 60 ± 0,2°C.
- Kalibrasi *Pressure gage*:

Sebelum dipasang, kelima *pressure gage* di-set pada 0 psig. Kemudian kelima *pressure gage* dihubungkan dengan kompresor. Setelah kompresor dijalankan, teramati bahwa kelima *pressure gage* tersebut menunjukkan angka yang sama. Kalibrasi dilakukan pada tekanan 30, 60, 90, 120, 150 psig.

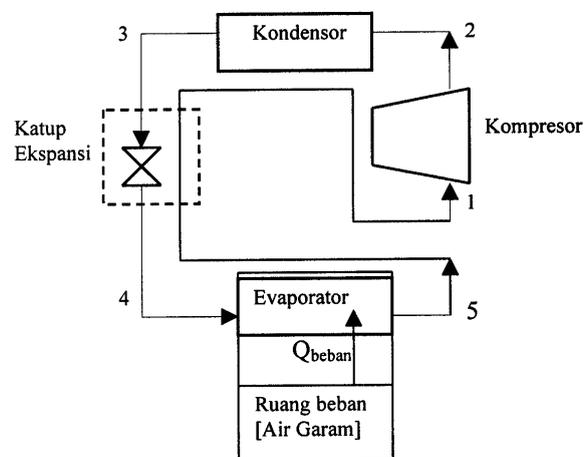
Eksperimen dilakukan untuk 3 kondisi yaitu:

- pipa kapiler tidak dililitkan pada *line suction*
- sebagian pipa kapiler (50% dari panjang) dililitkan pada *line suction*.
- Seluruh pipa kapiler dililitkan pada *line suction*.

Eksperimen dilakukan 4 kali untuk masing-masing kondisi.

Prosedur Ekperimen:

1. Memasang semua termometer dan *pressure gage*.
2. Mengisi *refrigerant*.
3. Menjalankan *freezer* selama ± 1 jam untuk mencapai kondisi *steady*.
4. Memasukkan bejana yang berisi air garam 12% sebanyak 560 gram ke ruang *freezer*. Bejana ini telah dilengkapi dengan termometer.
5. Agar beban pendinginan sama, maka pengukuran dilakukan pada saat yang sama yaitu: saat air garam mulai mencapai temperatur 6°C hingga -3°C dimana pengamatan dilakukan tiap penurunan 1°C. Pengukuran temperatur dan tekanan diambil di 5 titik seperti pada gambar 2.
6. Selain pengukuran temperatur dan tekanan, waktu yang diperlukan untuk menurunkan temperatur air garam sebesar 1°C juga dicatat.
7. Mengulangi prosedur eksperimen selama 4 kali (empat hari berbeda)
8. Mengulangi prosedur no. 3 s/d no. 6 untuk 2 kondisi yang lain.



Gambar 2. Titik pengukuran dalam eksperimen.

²⁾ Alumnus Teknik Mesin Universitas Kristen Petra

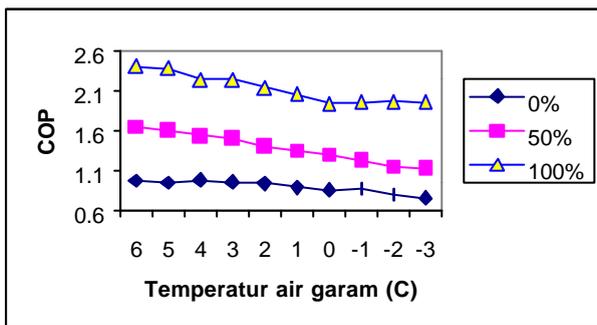
4. Hasil Eksperimen dan Diskusi

Contoh siklus pendingin dari freezer yang diamati dapat dilihat pada diagram P-h pada lampiran. Dari diagram P-h didapat besar entalpi (h) untuk tiap titik.

COP freezer berubah terhadap temperatur ruang beban

Dari eksperimen yang dilakukan, terlihat dalam gambar 3 bahwa COP mesin pendingin menurun saat temperatur air garam makin rendah. Temperatur ruang beban dapat diperkirakan mendekati atau sama dengan temperatur air garam.

Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: Saat temperatur air garam makin rendah berarti beda temperatur antara air garam dengan refrigerant dalam evaporator makin kecil. Hal ini berakibat kapasitas pendinginan freezer menurun. Dengan menurunnya kapasitas pendinginan maka COP juga menurun.



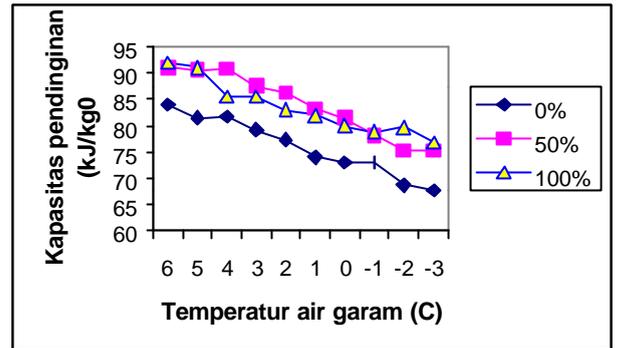
- 0% berarti pipa kapiler tidak dililitkan pada *line suction*,
- 50% berarti 50% panjang pipa kapiler yang dililitkan pada *line suction*,
- 100% berarti seluruh pipa kapiler yang dililitkan.

Gambar 3. COP Freezer Fungsi Temperatur Air Garam

Pengaruh usaha pelilitan pipa kapiler terhadap COP freezer

COP mesin pendingin yang dalam eksperimen ini freezer meningkat jika pipa kapiler dililitkan pada *line suction* seperti terlihat pada gambar 3.

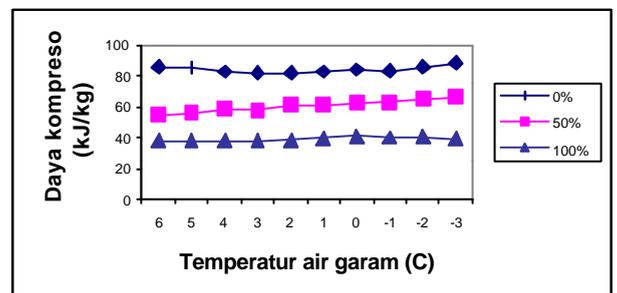
COP didapat dengan membagi kapasitas pendinginan dengan daya input kompresor seperti pada persamaan (5). Pada eksperimen ini tidak dapat diukur laju aliran massa refrigerant karena keterbatasan alat yang ada. Karena ini, maka kapasitas pendinginan pada gambar 4 dan daya kompresor pada gambar 5 merupakan besaran per laju aliran massa refrigerant.



Gambar 4. Kapasitas Pendinginan/Laju Aliran Massa Refrigerant Fungsi Temperatur Air Garam

Kapasitas pendinginan freezer tidak terlalu banyak berubah dengan melilitkan pipa kapiler ke *line suction* meskipun dari gambar 4 terlihat ada kenaikan. Meskipun refrigerant melepas panas saat mengalir dalam pipa kapiler yang dililitkan pada *line suction*, namun titik 4 dalam diagram P-h bergeser ke kanan. Kemungkinan hal ini terjadi karena pipa kapiler juga menerima panas dari lingkungan maupun kompresor mengingat temperatur refrigerant saat keluar pipa kapiler (masuk evaporator) sangat rendah yaitu sekitar -15°C .

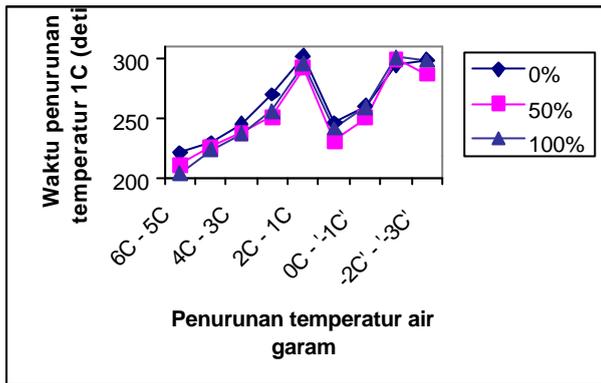
Dari diagram P-h terlihat bahwa karena pipa kapiler dililitkan pada *line suction* maka titik 1 (suction kompresor) bergeser ke kanan, dimana saat seluruh pipa kapiler dililitkan ternyata titik 1 berada di daerah superpanas, sedang keluaran kompresor hampir sama untuk semua kondisi. Pergeseran ini membuat enthalpy masukan kompresor (h_1) lebih tinggi sedang enthalpy keluaran (h_2) hampir sama, sehingga kerja kompresor lebih ringan. Entalpi h_1 paling tinggi saat seluruh pipa dililitkan sehingga daya input kompresor juga paling rendah pada kondisi itu. Hal ini dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Daya Kompresor/Laju Aliran Massa Refrigerant Fungsi Temperatur Air Garam

Karena kapasitas pendinginan sedikit meningkat dan daya input kompresor menurun saat pipa kapiler dililitkan pada *line suction*, maka COP freezer meningkat.

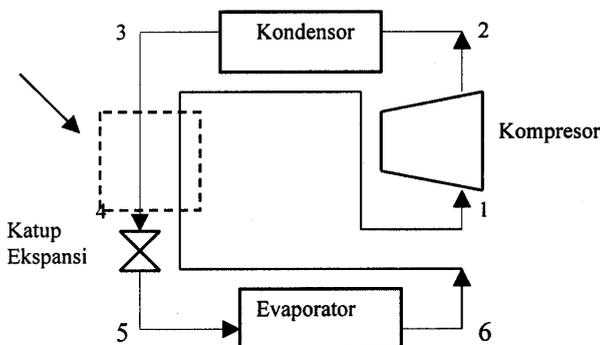
Pengaruh usaha pelilitan pipa kapiler terhadap Waktu Pendinginan



Gambar 6. Waktu Penurunan Temperatur Air Garam

Pengamatan terhadap waktu pendinginan air garam dalam ruang beban dilakukan mulai air garam mencapai 0°C hingga -3°C, dimana pengukuran dilakukan untuk penurunan tiap 1°C. Dari gambar 6 dapat dilihat bahwa waktu pendinginan yang diperlukan bertambah dengan makin rendahnya temperatur air garam. Namun, terjadi sesuatu yang aneh dimana saat temperatur air garam turun dari 1°C menjadi 0°C dan dari 0°C menjadi -1°C, waktu yang diperlukan justru menurun dan kemudian untuk berikutnya meningkat kembali. Hal ini perlu diselidiki lebih lanjut. Pada artikel ini tidak dibahas lebih jauh karena hal ini di luar tujuan eksperimen. Dari gambar 6 terlihat bahwa usaha melilitkan pipa kapiler pada *line suction* tidak membuat waktu pendinginan lebih singkat. Hal ini dapat dimengerti karena kapasitas pendinginan tidak banyak berubah.

Usaha yang dilakukan orang untuk meningkatkan performansi mesin pendingin adalah dengan meng'kontak'kan pipa (bukan pipa kapiler) yang keluar dari kondensor dengan *line suction* seperti pada gambar 7.



Gambar 7. Modifikasi Sistem Pendingin Kompresi-Uap.

Dengan melakukan hal ini, maka *refrigerant* saat masuk kompresor lebih super panas dan *refrigerant* saat masuk katup ekspansi (bisa pipa kapiler) dalam kondisi lebih sub-cooled, temperatur lebih rendah. Jika *refrigerant* masuk katup ekspansi lebih sub-cooled maka pada diagram P-h titik 4 lebih ke kiri dengan demikian titik 5 juga lebih ke kiri. Kondisi ini berakibat kapasitas pendinginan mesin pendingin lebih besar. Dengan membuat kapasitas pendinginan lebih besar, maka waktu pendinginan tentunya akan lebih singkat.

5. Kesimpulan

Dari eksperimen yang dilakukan dapat diambil kesimpulan:

- COP mesin pendingin menurun saat temperatur ruangan beban makin rendah.
- COP mesin pendingin meningkat jika pipa kapiler dililitkan pada *line suction*.
- Waktu pendinginan tidak berubah jika pipa kapiler dililitkan pada *line suction*.

Daftar Pustaka

1. Cengel, Y.A., Boles, M.A., *Thermodynamics: an engineering approach*, 3rd ed, McGraw Hill. 1999.
2. Moran, M.J., Shapiro, H.N., *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc. 2000.
3. Stoecker W.F., Jones, J.W., *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*, 2nd ed., Penerbit Erlangga. 1992.