

# KAJI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK PIPA KAPILER DAN KATUP EKSPANSI TERMOSTATIK PADA SISTEM PENDINGIN WATER-CHILLER

Iskandar R.

Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Andalas

## ABSTRAK

Seiring dengan kemajuan teknologi, manusia selalu berusaha untuk menciptakan kondisi udara yang nyaman dalam kehidupan sehari-hari. Salah satu cara yang sering dilakukan untuk beban pendinginan yang besar adalah dengan sistem pendingin water-chiller. Sistem pendingin ini merupakan kombinasi dari sistem pendingin kompresi uap dengan sistem pendinginan air yang dialirkan pada bagian evaporatornya. Untuk kebutuhan pendinginan yang optimal, maka sangat penting untuk mengetahui karakteristik dari mesin pendingin ini. Penelitian ini mengkaji seberapa jauh pengaruh penggunaan pipa kapiler dan katup ekspansi termostatik sebagai alat ekspansi pada sistem pendingin water chiller.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa performans katup ekspansi termostatik lebih baik dari pipa kapiler. Sistem pendingin dengan katup ekspansi mempunyai nilai COP antara 3,21 hingga 3,66, sedangkan pipa kapiler 2,15 hingga 2,46. Dari penelitian yang dilakukan untuk beberapa laju aliran massa air yang didinginkan, perbedaan laju energi yang dihasilkan pada evaporator rata-rata berkisar 43 - 47 % untuk katup ekspansi terhadap pipa kapiler.

## 1. PENDAHULUAN

Bangunan-bangunan yang memiliki beban pendinginan yang besar serta waktu operasi pemakaian pengkondisi udara hampir sama, umumnya menggunakan sistem pengkondisi udara sentral. Hal ini karena pertimbangan biaya operasional serta perawatan lebih murah dan mudah. Salah satu sistem pengkondisi udara sentral yang digunakan adalah sistem *water chiller*.

Untuk mendapatkan pendinginan yang diinginkan dari sistem *water chiller* ini, maka bagian evaporator dari sistem primer diupayakan sedemikian rupa sehingga mampu menyerap kalor dari air yang akan didinginkan (*chilled water*) semaksimal mungkin. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan memasang alat ekspansi yang tepat dan sesuai dengan karakteristik sistem *chiller water*. Alat ekspansi yang tersedia dipasaran dalam berbagai jenis, sehingga membingungkan untuk memilih mana yang cocok untuk sistem yang akan dibuat.

Dengan melihat banyaknya jenis alat ekspansi yang tersedia di pasaran itu, maka perlu dilakukan perbandingan kinerja dari alat ekspansi tersebut. Untuk tujuan itu, maka pada penelitian ini dilakukan pemasangan dua alat ekspansi (penurun tekanan) pada satu sistem yang sama yaitu berupa pipa kapiler dan katup ekspansi termostatik.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengkondisian udara adalah proses penanganan udara untuk mengontrol secara serempak terhadap temperatur, kelembaban, kebersihan dan distribusi

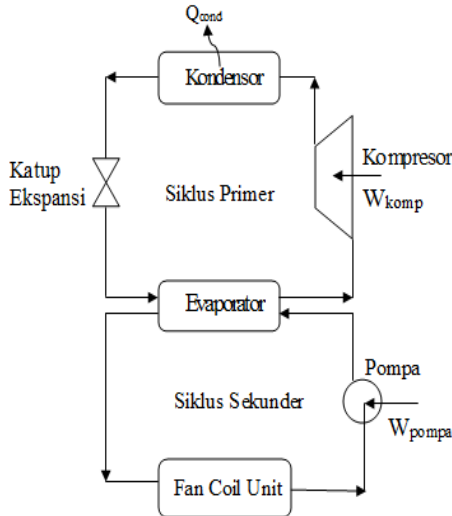
untuk mencapai kondisi yang diinginkan. Dengan melakukan pengkondisian udara tersebut, setiap orang dapat mengatur temperatur, kelembaban udara sesuai dengan yang diinginkan sehingga dapat menghasilkan pengkondisian udara nyaman (*comfort air conditioning*). Di masyarakat, alat pengkondisian udara ini biasa dikenal dengan sebutan AC (*Air Conditioning*), yang mana salah satunya adalah AC jenis *water chiller*.

AC jenis *water chiller* terdiri dari dua siklus yang saling berkaitan, siklus refrigeran primer dan siklus refrigeran sekunder. Pada siklus primer, refrigeran primer tersirkulasi melalui empat komponen utama AC yaitu kompresor, kondensor, alat ekspansi, dan evaporator. Refrigeran dikompresikan oleh kompresor menuju kondensor kemudian menuju alat ekspansi dan evaporator. Prinsip kerja pada siklus primer ini merupakan prinsip kerja kompresi uap. Refrigeran primer mengalami evaporasi dengan menyerap panas refrigeran sekunder untuk mendinginkan *chilled water*.

Pada siklus sekunder, refrigeran sekunder disirkulasikan oleh pompa dari evaporator ke AHU (*Air Handling Unit*), FCU (*Fan Coil Unit*) dan kembali lagi ke evaporator secara kontinu. Refrigeran sekunder yang biasa digunakan dalam hal ini adalah air.

Pada sistem *water chiller* ini, air pertama kali didinginkan pada bagian evaporator sistem refrigerasi untuk mendapatkan temperatur 40 sampai 50 °F (5 - 10 °C). Air ini kemudian dipompakan ke unit penanganan udara (AHU) dan terminal dimana udara akan dikondisikan. Setelah

melewati AHU temperatur *chilled water* meningkat berkisar 60 – 65 °F (16 – 19 °C) [10]. Kemudian untuk mendapatkan temperatur yang lebih rendah biasanya digunakan zat seperti *ethylene glycol* atau *propylene glycol*. Skema pendinginan pada sistem *chiller* dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem pendinginan *water chiller*

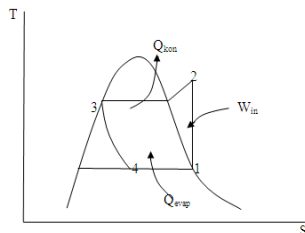
**2.1 Kajian Termodinamika Sistem Pendingin Kompresi Uap**

Agar dapat mengetahui proses-proses yang terjadi pada mesin pendingin, siklus termodinamika merupakan dasar terbentuknya proses-proses yang terjadi pada mesin pendingin kompresi uap.

**2.1.1 Siklus Kompresi Uap Ideal**

Fluida kerja yang masuk ke kompresor diusahakan tidak berupa campuran, untuk mencegah kerusakan kompresor yang disebabkan oleh cairan. Dalam daur Carnot ekspansi isentropik terjadi pada turbin, daya yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan kompresor yang juga akan menimbulkan kesulitan teknis. Untuk memperbaikinya digunakan katup ekspansi atau pipa kapiler dan proses berlangsung pada entalpi konstan.

Proses-proses yang membentuk siklus kompresi ideal diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram T-s siklus kompresi uap ideal

Saat refrigeran mengalir melalui evaporator, perpindahan panas dari media yang didinginkan menyebabkan refrigeran menguap. Dengan

mengambil refrigeran pada evaporator sebagai volume atur, dari keseimbangan massa dan hukum Termodinamika I didapat perpindahan panas per satuan massa refrigeran yang mengalir sebesar:

$$Q_{in} = Q_{evap} \quad (2.2)$$

Laju perpindahan panas disebut kapasitas pendinginan atau dampak refrigerasi. Dalam sistem satuan SI, kapasitas dinyatakan dalam kW, dan satuan lain yang sering dipakai adalah *ton of refrigeration*, yang sama dengan 211 kJ/menit.

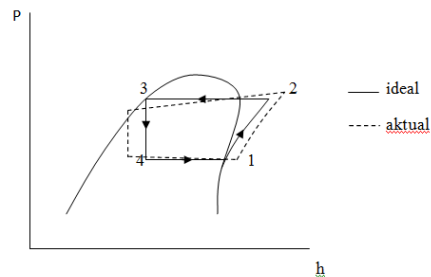
Refrigeran meninggalkan evaporator kemudian dikompresi hingga tekanan dan temperatur tinggi oleh kompresor. Selanjutnya, refrigeran mengalir melalui kondensor, dimana refrigeran mengembun dan memberikan panas ke udara sekitar yang lebih rendah temperaturnya.

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

$$h_3 = h_4 \quad (2.3)$$

**2.1.2 Siklus Kompresi Uap Aktual**

Penyimpangan siklus kompresi uap nyata dari siklus kompresi uap ideal diperlihatkan pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Perbandingan siklus aktual dan ideal

Untuk memperhitungkan penyimpangan dari siklus ideal sering dikenal dengan efisiensi isentropik yang didefinisikan sebagai :

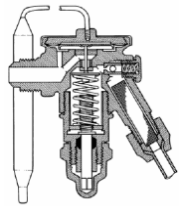
Dimana  $W_a$  menyatakan kerja kompresor sebenarnya dan  $W_s$  adalah kerja teoritis kompresor isentropik. Dari persamaan di atas terlihat bahwa kerja sebenarnya yang dibutuhkan kompresor lebih besar dibandingkan dengan kerja teoritis kompresor isentropik. Apabila operasi dimaksudkan untuk tujuan pendinginan maka indeks prestasi sistem sebanding dengan panas yang diserap evaporator dibanding dengan kerja kompresor sebenarnya.

Dimana  $Q_{1,4} = Q_{\text{evap}}$  dan  $W_a$  dapat dinyatakan sebagai selisih entalpi.

## 2.2 Katup Ekspansi Termostatik

Katup ekspansi termostatik adalah jenis katup yang paling banyak digunakan, karena efisiensinya tinggi dan mudah diadaptasikan dengan berbagai aplikasi refrijerasi.

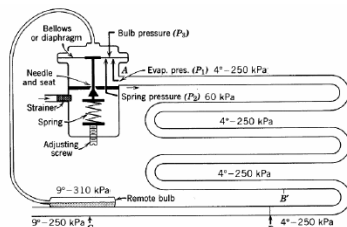
Bagian utama katup ekspansi termostatik adalah katup jarum dan dudukannya, diafragma, *remote bulb* yang berisi refrigeran cair, dilengkapi dengan pipa kapiler yang langsung terhubung ke diafragma, dan pegas yang dapat diatur tekanannya melalui sekrup pengatur tekanan. Seperti semua piranti kontrol laju aliran refijeran lainnya, katup ekspansi termostatik juga dilengkapi dengan filter dari kasa baja yang diletakkan di sisi masukan katup. Skema dari katup ekspansi termostatik dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Katup ekspansi termostatik <sup>[2]</sup>

*Remote bulb* dipasang pada sisi keluaran evaporator, dicekam atau diklem kuat pada saluran outlet evaporator agar dapat mendeteksi atau merespon langsung temperatur refrigeran yang mengalir pada sisi outlet evaporator.

Kerja katup ekspansi termostatik merupakan hasil interaksi tiga jenis tekanan yang bekerja pada diafragma, yaitu tekanan pegas dan tekanan evaporasi yang akan menekan diafragma sehingga cenderung menutup katup. Dan tekanan yang dihasilkan oleh refrigeran saturasi yang ada di dalam *remote bulb* bila refrigerannya mengembang yang melawan tekanan pegas dan tekanan evaporasi, sehingga cenderung membuka katup. Gambar 2.5 memperlihatkan gambar skema prinsip kerja katup ekspansi termostatik.



Gambar2.5 Skematik cara kerja katup

## 2.3 Pipa Kapiler

Sistem pengontrol laju refrigeran yang paling sederhana adalah pipa kapiler. Seperti namanya pipa kapiler terdiri dari pipa panjang dengan diameter yang sangat kecil. Diameter pipa kapiler antara 0,26 inci sampai 0,4 inci.

Pipa kapiler digunakan untuk menurunkan tekanan refrigeran dari kondisi sub dingin hingga fasa campuran. Penurunan tekanan di dalam pipa kapiler disebabkan oleh gesekan dan percepatan refrigeran. Pipa kapiler biasanya digunakan untuk sistem yang berkapasitas kecil hingga 10 kW.

Pada ukuran panjang dan diameter tertentu, pipa kapiler memiliki tahanan gesek yang cukup tinggi sehingga dapat menurunkan tekanan kondensasi yang tinggi ke tekanan evaporasi yang rendah. Pipa kapiler berfungsi menakar jumlah refrigeran cair ke evaporator dan untuk menjaga beda tekanan antara tekanan kondensasi dan tekanan evaporasi tetap konstan.

## 3. METODOLOGI

### 3.1 Alat Uji Sistem Pendingin Water Chiller

Alat uji yang digunakan pada percobaan ini merupakan sistem pendingin dengan dua siklus, yaitu siklus Mesin Pendingin Kompresi Uap (MPKU) sebagai siklus primer dan siklus *water chiller* sebagai siklus sekunder. Siklus MPKU merupakan siklus yang sebagian besar digunakan pada sistem pendingin, seperti yang diuraikan di atas. Sedangkan siklus sekunder memanfaatkan temperatur dingin dari evaporator untuk mendinginkan air yang dialirkan melalui pipa dengan cara memompakannya ke dalam casing evaporator. Untuk lebih jelas, alat uji dapat dilihat pada Gambar 3.1.

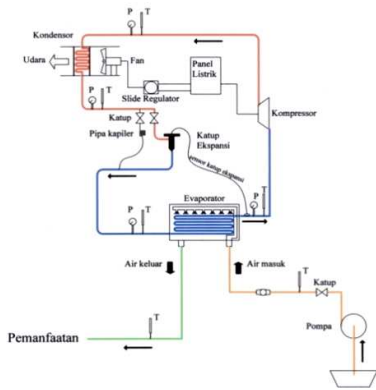


Gambar 3.1 Instalasi pengujian sistem *water chiller*

### 3.2 Sistem Pemipaan

Sistem pemipaan merupakan saluran untuk mengalirkan refrigeran ke masing-masing komponen utama dengan bentuk siklus tertutup. Sistem pemipaan dibuat sedemikian rupa sehingga tidak terjadi kebocoran refrigeran sebagai fluida pendingin. Sistem pemipaan terbuat dari pipa tembaga dengan diameter 1/2 in untuk saluran dari

evaporator ke kompresor serta 3/8 in dari kompresor ke kondensor. Dari kondensor ke alat ekspansi serta dari alat ekspansi ke evaporator menggunakan pipa tembaga dengan diameter 1/2 in. Skema sistem pemipaan dari alat ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema pemipaan sistem water chiller

**3.3 Komponen Peralatan Pengujian**

Sistem Pendingin *Water chiller* menggunakan dua siklus refrigerasi, siklus refrigeran primer dan siklus refrigeran sekunder, berikut komponen yang menyusun siklus tersebut:

**3.3.1 Komponen Siklus Refrigeran Primer**

Komponen utama yang menyusun siklus refrigeran primer antara lain :

1. Satu unit kompresor 2 PK
2. Satu unit kondensor dan saluran udara
3. Dua unit alat ekspansi berupa pipa kapiler dan katup ekspansi
4. Satu unit evaporator

**3.3.2 Komponen Siklus Refrigeran Sekunder**

Komponen utama yang menyusun siklus refrigeran sekunder antara lain :

1. Satu unit pompa sentrifugal.
2. Satu unit katup.
3. Satu unit *chiller water*.
4. Satu unit *watermeter*.

**3.4 Instrumentasi**

**3.4.1 Instrumen Tekanan**

Untuk mendapatkan keadaan tekanan refrigeran digunakan pengukur tekanan tabung bourdon yang banyak digunakan dalam pengukuran tekanan statik.

*Pressure gage* yang digunakan untuk pengukuran tekanan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Pressure gauge*; (a) untuk *high pressure* (b) untuk *low pressure*

**3.4.2 Instrumen Temperatur Refrigeran**

Untuk mengukur temperatur refrigeran pada tingkat keadaan 1, 2, 3 dan 4 digunakan termometer digital dengan sensor termokopel.

**3.4.3 Instrumen Temperatur Chiller**

Untuk mengukur temperatur keluar dan masuk dari *chiller* digunakan termometer digital dengan sensor termokopel.

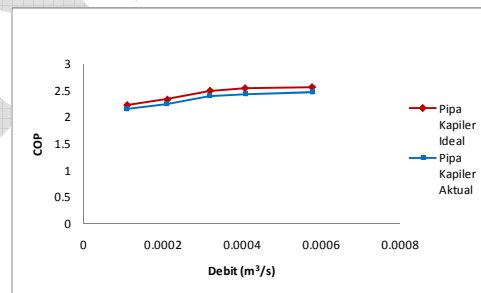
**3.4.4 Instrumen Daya Kompresor**

Daya kompresor ditentukan dengan mengukur besarnya arus listrik menggunakan *amperemeter*, mengukur tegangan listrik menggunakan *voltmeter* dan kemudian dikalikan dengan  $\cos \phi$ .

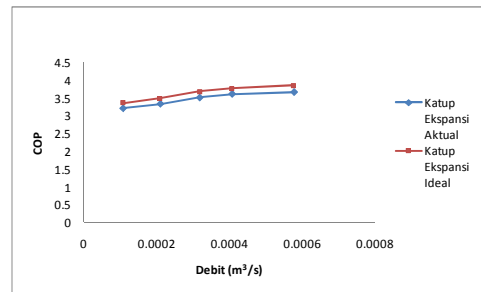
**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Perbandingan Ideal dan Aktual**

Dari penelitian yang dilakukan diperoleh hasil bahwa secara keseluruhan kondisi ideal lebih baik dari kondisi aktual. Pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa kondisi ideal selalu mempunyai nilai COP (*coefficient of performance*) yang lebih besar dibandingkan dengan nilai COP aktualnya.



Gambar 4.1 Perbandingan COP kondisi ideal dan aktual pada pipa kapiler



Gambar 4.2 Perbandingan COP kondisi ideal dan aktual pada katup ekspansi

Untuk debit air sebesar 0,000109 m<sup>3</sup>/s pipa kapiler pada kondisi ideal mempunyai COP sebesar 2,22 sedangkan pada kondisi aktualnya sebesar 2,15. Penambahan ini terus sebanding sampai dengan debit maksimal 0,000578 m<sup>3</sup>/s dimana COP kondisi

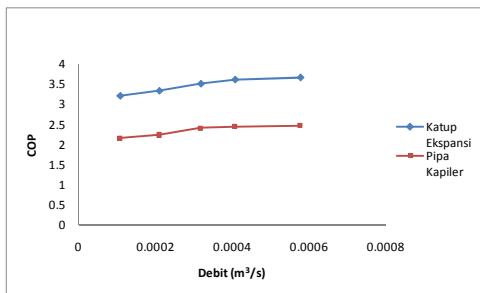


ideal sebesar 2,55 dan pada kondisi aktual 2,46. Kondisi ideal yang lebih besar dibandingkan kondisi aktualnya juga terjadi pada katup ekspansi termostatik.

Keadaan ini terjadi karena pada kondisi ideal diasumsikan tidak ada energi yang hilang selama proses pendinginan berlangsung. Dengan kata lain tidak ada proses yang *irreversible* apakah itu berupa penurunan tekanan akibat gesekan maupun perpindahan kalor ke lingkungan. Sehingga proses kompresi berlangsung secara isentropik. Berbeda dengan siklus aktual yang dalam siklusnya terjadi *irreversibilitas* sehingga mengakibatkan kerja yang dibutuhkan pada proses kompresi menjadi lebih besar. Walaupun kapasitas refrigerasi untuk kedua kondisi ini sama. Hal ini akan berpengaruh terhadap nilai koefisien kinerja siklus yang mengakibatkan COP pada kondisi aktual lebih kecil dari COP kondisi ideal.

#### 4.2 Perbandingan Alat Ekspansi

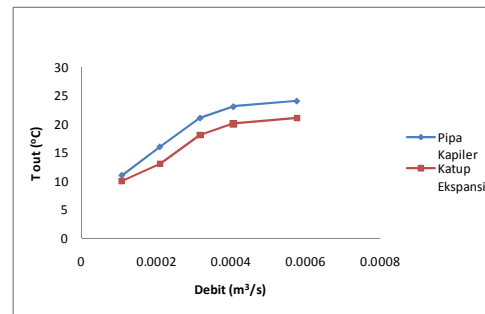
Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa nilai COP dari katup ekspansi termostatik lebih besar dibandingkan dengan nilai COP dari pipa kapiler. Pada debit maksimal sebesar 0,000578 m<sup>3</sup>/s katup ekspansi termostatik mempunyai COP sebesar 3,66 sedangkan pipa kapiler sebesar 2,46.



**Gambar 4.3** Perbandingan COP aktual alat ekspansi terhadap debit

Dengan melihat keadaan ini maka dapat dikatakan katup ekspansi termostatik memiliki kemampuan pendinginan yang lebih baik dibandingkan pipa kapiler. Hal ini disebabkan karena katup ekspansi termostatik dapat bekerja terhadap perubahan beban dan perubahan tekanan evaporator. Perubahan tersebut akan mengontrol bukaan katup sehingga laju aliran massa refrigeran cenderung disesuaikan dengan perubahan beban pendinginan. Dalam hal ini, laju aliran massa katup ekspansi termostatik juga lebih besar dari pipa kapiler, sehingga penyerapan kalor evaporator dan pelepasan kalor kondensor menjadi lebih besar.

Bertambahnya debit air menyebabkan energi yang diserap oleh refrigeran di evaporator menjadi bertambah besar, sedangkan kerja kompresor tidak mengalami perubahan yang begitu signifikan atau tetap. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4.

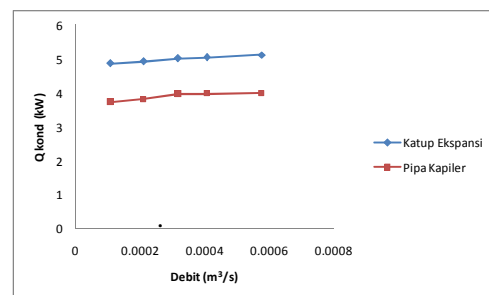


**Gambar 4.4** Pengaruh debit air pada temperatur air keluar water chiller

Dari Gambar 4.4 di atas dapat dilihat temperatur air keluar sistem dengan menggunakan katup ekspansi termostatik lebih rendah dari pada keluaran pipa kapiler, untuk debit 0,000109 m<sup>3</sup>/s katup ekspansi sanggup mendinginkan sampai dengan 10 °C sedangkan pipa kapiler 11 °C dan untuk debit maksimal 0,000578 m<sup>3</sup>/s katup ekspansi sanggup mendinginkan sampai 21°C sedangkan pipa kapiler 24 °C. Jadi dari keadaan ini kemampuan pendinginan menggunakan katup ekspansi lebih baik dari pada pipa kapiler.

Sesuai dengan pembahasan sebelumnya bahwa kemampuan pendinginan di pengaruhi oleh nilai COP sistem tersebut, untuk nilai COP yang lebih besar berarti kemampuan pendinginan akan semakin besar pula. Pada percobaan ini katup ekspansi termostatik mempunyai COP yang lebih besar dari pipa kapiler, sehingga efek pendinginannya pun lebih besar.

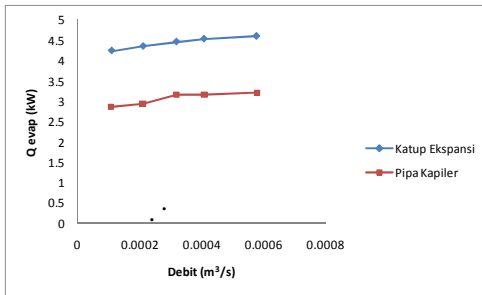
Gambar 4.5 juga membuktikan bahwa untuk setiap penambahan debit air terjadi kenaikan pelepasan panas atau kalor pada kondensor. Pada debit air 0,000578 m<sup>3</sup>/s nilai kalor yang dilepaskan untuk katup ekspansi 5,12 kW, sedangkan untuk pipa kapiler adalah 3,21 kW.



**Gambar 4.5** Pengaruh debit air pada pelepasan kalor kondensor

Peningkatan pelepasan kalor pada kondensor ini seiring dengan penambahan debit air yang mengalir melalui evaporator, dimana setiap penambahan debit air tersebut mengakibatkan kalor yang diserap oleh evaporator menjadi bertambah pula. Bertambahnya kalor yang diserap oleh evaporator menyebabkan temperatur refri-geran menjadi bertambah, sehingga kalor yang dibuang pada kondensor pun menjadi

meningkat. Lebih besarnya kalor yang dibuang oleh katup ekspansi dibandingkan dengan pipa kapiler karena dipengaruhi oleh laju aliran massa refrigeran yang berbeda, dimana laju aliran massa refrigeran pada katup ekspansi lebih besar dari pada pipa kapiler.



**Gambar 4.6** Pengaruh debit air pada penyerapan kalor evaporator

Keadaan yang sama juga diperlihatkan pada Gambar 4.6, dimana untuk perubahan debit yang semakin besar, kalor yang diserap evaporator semakin meningkat. Dan dengan alasan yang sama dengan Gambar 4.5, katup ekspansi mempunyai penyerapan kalor yang lebih besar dari pada pipa kapiler. Peningkatan rata-rata antara katup ekspansi terhadap pipa kapiler adalah 43 – 47%.

## 5. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan pada sistem pendingin *water chiller* dengan alat ekspansi yang berbeda, didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Katup ekspansi termostatik mempunyai performans yang lebih baik dibandingkan dengan pipa kapiler.
2. Kondisi aktual, katup ekspansi mempunyai COP antara 3,21 – 3,66, sedangkan pipa kapiler mempunyai COP antara 2,15 – 2,46.
3. Katup ekspansi termostatik menghasilkan temperatur keluaran *chilled water* yang lebih rendah dibandingkan pipa kapiler.
4. Penambahan debit air *chiller* berbanding lurus dengan energi yang diserap oleh evaporator.
5. Energi yang diserap oleh evaporator berbanding lurus dengan COP sistem pendingin.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ASHRAE, 2000, *HVAC Systems And Equipment Handbook*.
2. Hasan, Syamsuri dkk., 2008, *Refrigerasi Dan Tata Udara*, Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta.
3. <http://www.wikipedia.com>
4. <http://www.beritaiptek.com>
5. Lizardos, E. J., 1995, *Engineering Primary-Secondary Chilled-Water Systems*, Engineered Systems, no. 8, pp 30–34.

6. McQuiston, Faye, 1994, *Heating, Ventilating And Air Conditioning Analysis And Design*, Jhon Wiley & Sons Inc, New York
7. Moran, J. and H.N. Shapiro, 2006, *Fundamentals of Engineering Thermo-dynamics 5<sup>th</sup> Ed.*, John Wiley & Sons.
8. Redden, G. H., 1996, *Effect of Variable Flow on Centrifugal Chiller Performance*, ASHRAE Transactions, Part II, pp. 684–687.
9. Stoecker, W.F. and Jones, J.W., 1982, *Refrigeration and Air Conditioning*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
10. Wang, Shan K, 2000, *Handbook Of Air Conditioning And Refrigeration*, Mc Graw – Hill.