

KAJIAN PENGARUH TEMPERATUR APPROACH EVAPORATOR DAN KONDENSER TERHADAP PERFORMANSI SISTEM AC SENTRAL TIPE WATER CHILLERS

I Nyoman Gede Baliarta*, I Nyoman Suamir dan Made Ery Arsana

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Bali, 80364, Indonesia

*Tel.: +62 361701981, E-mail: baliarta@gmail.com

Abstrak: Artikel ini mengkaji secara numerik dan eksperimental pengaruh temperatur approach kondensor dan evaporator terhadap kinerja suatu sistem AC sentral tipe water chiller. Karakteristik kinerja sistem AC sentral dianalisis pada berbagai temperatur approach dan pada berbagai refrigeran seperti R-22, R-134a, R-407c dan R-410a. Empat buah model numeric telah dikembangkan pada sebuah software dengan platform EES (Engineering Equations Solver) untuk mensimulasikan kinerja dari sistem. Semua model telah divalidasi dengan menggunakan data dari hasil eksperimen yang diukur langsung di industry. Hasil dari investigasi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan temperatur approach kondenser sebesar 1 K dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem AC sentral 3,45%;3,4%;3,3% dan 3,6% berturut turut untuk sistem dengan refrigeran R-22, R-134a, R-407c dan R-410a. Paper ini juga menyajikan karakteristik kinerja sistem AC sentral tipe water chiller pada berbagai temperatur approach dan berbagai jenis refrigeran yang dapat memberikan indikasi perlunya perawatan sistem AC untuk menjaga agar kinerja sistem tetap pada kondisi terbaik.

Katakunci: *Temperatur-approach, kondenser, evaporator, performansi dan AC-sentral*

Study of Evaporator and Condenser Approach Temperature Effect toward Performance of Water Chiller AC

Abstract: *This paper presents numerically and experimentally study of the effect of approach temperatures to temperature and energy performances of AC system type water-cooled chillers. Performance characteristics of the AC systems were analyzed at various approach temperatures and different refrigerants including refrigerant R-22, R-134A, R-407C and R-410A. Four numerical models have been developed in EES (Engineering Equations Solver) program to simulate the performances. The models were validated using data obtained from experimental investigation directly in hotel industries. The results showed that the increase of condenser and evaporator approach temperatures could cause the AC system to operate at a lower performance. The increase of condenser approach temperature by 1 K could reduce coefficient of performance (COP) of about 3.45%, 3.4%, 3.3% and 3.6% respectively for AC system with R-22, R-134A, R-407C and R-410A. This paper also presents the characteristic of condenser and evaporator approach temperatures that can provide indication the necessity of AC system maintenance in order to keep the best possible performance.*

Keywords: *approach temperature, condenser, evaporator, energy performance and water-cooled chillers*

I. PENDAHULUAN

Konsumsi energi nasional untuk sektor komersial termasuk bangunan gedung perkantoran, rumah sakit, hotel, pusat perdagangan, bandara sebesar 3% dari total konsumsi energi nasional. Meskipun secara persentase jumlahnya kecil, pembangunan gedung komersial terus berlangsung dan jumlahnya akan meningkat. Di samping itu, potensi penghematan energi dan penurunan dampak lingkungan untuk sektor komersial masih cukup besar (HAKE, 2014).

Untuk bangunan komersial khususnya hotel, fasilitas yang lahap energi adalah sistem pengkondisian udara (AC: *air conditioning*) dan sistem produksi air panas. Kedua sistem ini bisa mencapai 70% dari total energi yang digunakan (AEE, 2014). Pertumbuhan industri hotel di Indonesia relatif cukup tinggi dengan rata-rata pertumbuhan dalam tiga

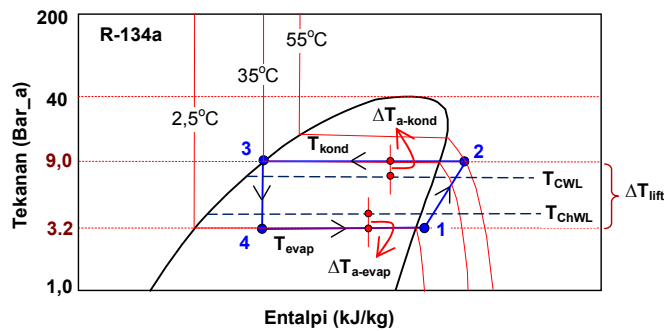
tahun terakhir sekitar 11.2% (BPS, 2013). Dengan demikian, penghematan konsumsi energi atau peningkatan efisiensi penggunaan energi akan berkontribusi sangat signifikan terhadap pengurangan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca ke lingkungan secara nasional. Menghemat penggunaan energi akan memberi manfaat ganda. Pertama, bagi industri gedung/hotel yang berarti mengurangi biaya operasi dan menambah profit serta dayasaing. Kedua, manfaat menghemat energi secara nasional akan dapat mengurangi beban penyediaan energi dan emisi gas rumah kaca atau dampak lingkungannya.

Salah satu faktor yang dapat memperparah tidak dapat dicapainya penghematan energi dari sistem AC sentral pada gedung komersial adalah kurangnya pengetahuan operator operasional dan perawatan tentang parameter operasi kritis dari sistem AC khususnya AC sentral tipe *water chiller*. Parameter

operasi kritis yang sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem AC sentral adalah temperatur *approach* evaporator dan kondenser.

Temperatur *approach* evaporator merupakan beda temperatur *chilled water* yang keluar evaporator dengan temperatur evaporasi refrigeran di dalam evaporator. Temperatur *approach* kondenser adalah beda temperatur kondensasi refrigeran di dalam kondenser dengan temperatur *cooling water* yang keluar kondenser. Besar kecilnya efek temperatur *approach* terhadap kinerja sistem AC sentral dipengaruhi oleh jenis refrigeran yang digunakan R-22, R-134a, R-407c atau R-410a. Konsep temperatur *approach* dalam diagram tekanan entalpi dan pada sistem AC disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Meningkatnya temperatur *approach* pada kondenser dan evaporator merupakan indikasi bahwa perpindahan panas pada kedua komponen ini sudah mulai menurun. Untuk mempertahankan kapasitas pendinginan dari sistem AC dengan temperatur *approach* kondenser maupun evaporator yang tinggi akan diperlukan temperatur kondensasi yang lebih tinggi pada kondenser dan temperatur evaporasi yang lebih rendah pada evaporator. Sebagai akibatnya, temperatur *lift* dari kompresor (ΔT_{lift}) akan meningkat yang disertai dengan peningkatan tekanan kerja dan energi yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Gambar 2 juga menunjukkan posisi instrumentasi yang diperlukan untuk memonitor temperatur *approach* sebuah sistem AC sentral tipe *water chiller*.



$$\Delta T_{a-kond} = \text{Temperatur approach kondenser} = T_{kond} - T_{CW}$$

$$\Delta T_{a-evap} = \text{Temperatur approach evaporator} = T_{evap} - T_{ChWL}$$

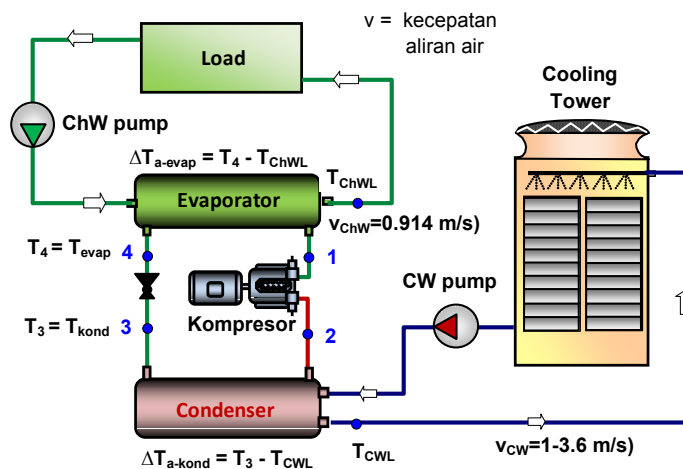
$$T_{kond} = \text{Temperatur kondensasi}$$

$$T_{evap} = \text{Temperatur evaporasi}$$

$$T_{CWL} = \text{Temperatur cooling water leaving}$$

$$T_{ChWL} = \text{Temperatur chilled water leaving}$$

Gambar 1. Konsep temperatur approach pada diagram P-h Dimodifikasi dari ASHRAE (2013)



Gambar 2. Konsep temperatur approach pada sistem AC sentral tipe water chiller Dimodifikasi dari York (2010)

Temperatur *approach* juga sangat bermanfaat untuk memonitor kinerja dari evaporator, condenser, dan sistem AC chiller secara keseluruhan. Dengan melakukan pencatatan temperatur *approach* kondenser misalnya, sebagai bagian dari program perawatan akan dapat memberikan indikator bahwa sisi air dari pipa kondenser sudah berkerak dan perlu dibersihkan. Zhao et al. (2012) telah melakukan penelitian tentang metode untuk mendeteksi lapisan kerak (*fouling*) pada permukaan pipa kondenser. Didiskusikan berbagai penyebab kerusakan pada *chiller* seperti kurangnya *cooling water* pada kondenser, kurangnya *chilled water* pada evaporator, kekurangan/kelebihan refrigeran dan kondenser berkerak (*condenser fouling*). Ditemukan bahwa kondenser *fouling* berpotensi paling tinggi menjadi penyebab kerusakan sistem AC *chiller*. *Fouling* dapat menyebabkan temperatur *approach* memiliki pengaruh yang lebih kuat terhadap kapasitas perpindahan panas pada kondenser dan kinerja sistem AC *chiller*.

Temperatur *approach* kondenser memiliki pengaruh yang relatif lebih dominan terhadap kinerja sistem AC sentral. Temperatur *approach* kondenser menunjukkan kemampuan kondenser untuk membuang panas atau dapat juga menunjukkan seberapa bersih permukaan pipa kondenser. Apabila temperatur *approach* semakin tinggi akan diperlukan temperatur kondensasi yang semakin tinggi untuk membuang panas ke *cooling water*. Hal ini menyebabkan tekanan kerja dan konsumsi energi kompresor juga semakin tinggi. Pada kasus dimana temperatur *approach* kondenser tidak dimonitor dengan ketat akan menyebabkan pipa kondenser meledak dan bocor.

Temperatur *approach* evaporator lebih dimanfaatkan sebagai indikator ketepatan pengisian refrigeran ke dalam sistem AC sentral yang juga sebagai indikasi seberapa efisien sistem AC beroperasi. Perubahan temperatur *approach* evaporator sangat kecil dipengaruhi oleh kerak pada permukaan. Pada umumnya permukaan evaporator relatif bebas dari kerak. Menurut York (2010), temperatur *approach* evaporator dikombinasikan dengan *compressor discharge superheat* dapat digunakan untuk menentukan jumlah pengisian refrigeran yang paling efisien.

Dalam rangka mengurangi efek dari temperatur *approach* terutama pada kondenser dapat dilakukan optimasi pada temperatur air pendingin (*cooling water*) dari kondenser. Liu dan Chuah (2011) mengusulkan sebuah kontrol strategi untuk secara rutin (setiap jam) menset ulang temperatur air pendingin sehingga efek dari temperatur *approach* tidak berpengaruh kepada temperatur kondensasi. Konsekuensinya apabila temperatur *approach* semakin tinggi akan diperlukan putaran fan yang tinggi pada *cooling tower* untuk memenuhi kebutuhan air pendingin kondenser yang berarti ada peningkatan konsumsi energi dari *cooling tower*. Walaupun demikian kontrol strategi yang diusulkan memiliki potensi penghematan energi sebesar 4% per tahun.

Monfet dan Zmeureanu (2012) melaporkan bahwa di dalam gedung komersial, AC chiller mengonsumsi jumlah energi listrik yang besar. Dianjurkan untuk memonitor secara rutin kinerja sistem AC untuk mendeteksi lebih awal penurunan kinerja terhadap waktu yang antara lain bisa disebabkan oleh *fouling* pada kondenser. Yu dan Chan (2012, 2013) telah melakukan analisis multivariable yang berkorelasi dengan COP dari sistem AC chiller yang antara lain temperatur *chilled and cooling water*. Studi ini mendemonstrasikan bahwa variable operasi harus selalu dimonitor dengan ketat untuk meningkatkan performansi sistem dengan efisiensi teknis yang lebih besar.

Barry et al. (2013) melakukan studi tentang konsumsi energi pada AC *chiller* di gedung hotel. Pengaruh variabel operasi seperti tingkat hunian, luas lantai, jumlah karyawan, dan temperatur udara luar terhadap performansi sistem AC diinvestigasi. Dilaporkan bahwa temperatur udara luar yang berkorelasi langsung dengan temperatur *cooling water* dan temperatur *approach* menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja sistem AC. Studi ini juga melaporkan bahwa pada gedung-gedung komersial seperti hotel, operasi dari AC *chiller* mengonsumsi energi listrik paling besar. Studi tentang efek temperatur udara luar terhadap operasi sistem AC *chiller* juga dilakukan oleh Yu et al. (2012).

Observasi yang dilakukan pada berbagai gedung komersial di Indonesia, ditemukan sebagian besar operator operasional dan perawatan tidak menaruh perhatian khusus pada parameter operasi kritis temperatur *approach* kondenser dan evaporator. Kasus pada MCC (Mercure Convention Center) Ancol, Jakarta, sistem AC sentralnya dibiarkan beroperasi pada temperatur *approach* kondenser yang tinggi lebih dari 10°C. Kemudian ditemukan kapasitas pendinginan menjadi berkurang dan tidak dapat mencapai temperatur ruangan yang dikehendaki seperti sebelumnya. Di samping itu, konsumsi energi juga dilaporkan meningkat. Kemudian pada Desember 2013 sistem AC diperiksa dan dilakukan *descaling* pada kondenser. Kondenser kemudian dapat beroperasi pada temperatur *approach* kondenser di bawah 1°C dan kapasitas pendinginan kembali relatif seperti kondisi sebelumnya. Kasus lebih parah terjadi pada Supermarket Carrefour di Sunset Road Denpasar Bali, pipa kondenser ditemukan meledak, setelah diselidiki diketahui pipa kondenser sangat dipenuhi dengan tumpukan kerak yang sangat tebal. Kasus yang lebih ringan yang menunjukkan adanya pengetahuan tentang pentingnya parameter operasi kritis, terjadi pada Gedung Terminal Internasional Bandara Ngurah Rai. Pada bulan Maret 2014 sudah dilakukan pembongkaran kondenser *chiller* karena adanya indikasi peningkatan temperatur *approach* kondenser. Ditemukan lapisan kerak yang relatif tebal dan selanjutnya kondenser dibersihkan melalui proses *descaling*. Walaupun *chiller* di gedung ini relatif sangat baru kurang dari 1 tahun, ternyata kerak sudah

sangat tebal. Hal ini mengindikasikan bahwa kualitas *cooling water* tidak memenuhi kualitas yang direkomendasikan.

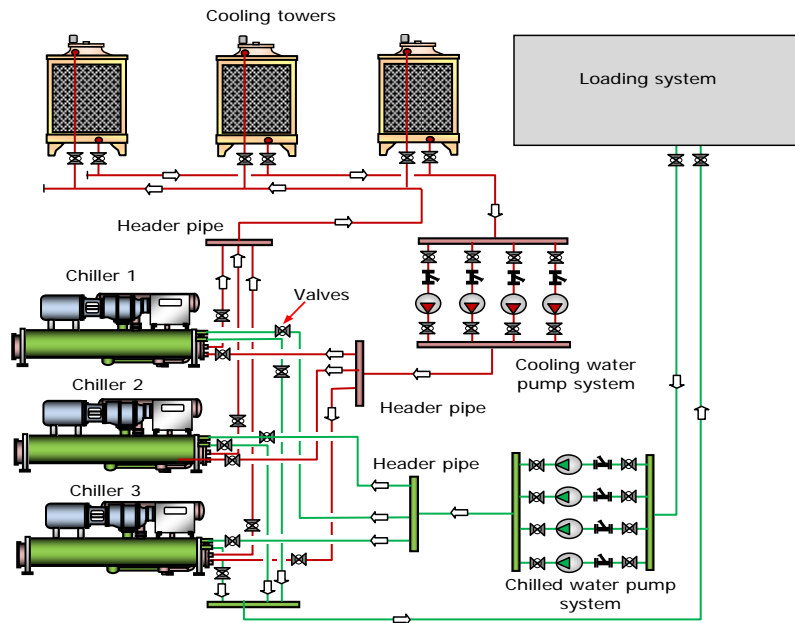
Paper ini akan mengkaji secara teoritik dan empirik efek dari temperatur *approach* evaporator dan kondenser sebagai parameter operasi kritis terhadap energi performansi dari sistem AC tipe *water chiller*. Kajian akan mencakup variasi konsumsi energi dan kapasitas pendinginan AC sentral tipe *water chiller* pada berbagai temperatur *approach* evaporator dan kondenser. Kajian mencakup empat jenis AC sentral dengan refrigeran yang berbeda R-22, R-134a, R-407c dan R-410a. Rentang temperatur *approach* untuk masing-masing jenis *chiller* yang dianggap masih

mampu memberikan kinerja sistem AC yang efisien juga akan dianalisis.

II. METODE YANG DITERAPKAN

Metode penelitian yang diterapkan merupakan kajian teoritik dan eksperimental parameter operasi kritis dari sistem AC sentral tipe *water chiller* pada aplikasi gedung komersial.

Skematik tipikal sistem AC sentral tipe *water chiller* lengkap dengan sistem pompa *cooling water*, pompa *chilled water*, *cooling tower* dan sistem *loading* pada industri komersial/gedung yang diinvestigasi dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skematik tipikal sistem AC sentral tipe *water chiller* yang ada di sebuah gedung komersial

Variabel yang diinvestigasi terdiri atas variabel terikat dan variabel bebas. Parameter yang termasuk dalam variabel terikat mencakup konsumsi energi, kapasitas pendinginan, dan COP (*Coefficient of Performance*), sedangkan parameter yang merupakan variabel bebas meliputi temperatur *approach*, temperatur refrigeran, temperatur *cooling* dan *chilled water*, temperatur lingkungan, tekanan refrigeran, laju aliran volume refrigeran, dan air.

Instrumen untuk kajian numerik dan eksperimental mencakup : program EES (*Engineering Equations Solver*), sensor, transducer dan sistem data logger, *energy meter* dan *flow meter*. Kajian eksperimen dilakukan dengan melakukan pengujian langsung pada sistem AC sentral di sebuah hotel di Bali. Sistem AC yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 4. Sedangkan data-data yang diperoleh diolah dalam program *spread sheet*. Hasil eksperimen digunakan untuk memvalidasi model numerik yang dibuat melalui program EES.



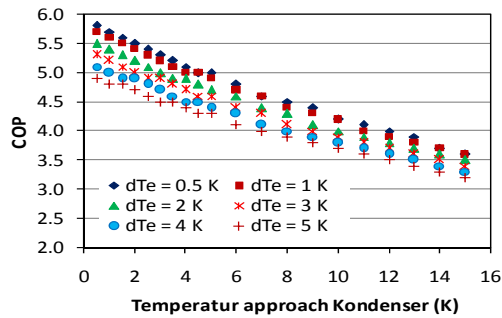
Gambar 4. Foto sistem AC *water cooled chiller* yang diinvestigasi

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Model numerik untuk sistem AC *water cooled chiller* merupakan salah satu hasil dari kajian yang dilakukan. Empat model numerik telah dibuat masing-masing untuk sistem dengan refrigeran R-22, R-134a, R-407c dan R-410a. Model numerik yang dihasilkan sudah divalidasi dengan hasil eksperimen. Kemudian model numerik tersebut

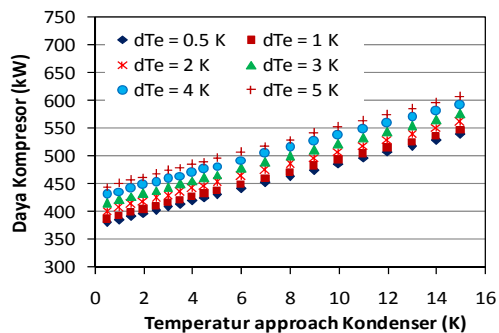
digunakan untuk menyimulasikan pengaruh dari temperatur *approach* kondenser dan evaporator terhadap kinerja sistem AC.

Pada Gambar 5 ditunjukkan karakteristik COP (*Coefficient of Performance*) pada berbagai temperatur *approach* kondenser dan evaporator untuk sistem AC *chiller* yang menggunakan refrigeran R-22. Secara umum COP menurun apabila temperatur *approach* kondenser maupun evaporator meningkat.



Gambar 5. Karakteristik COP sistem AC *Chiller* dengan refrigeran R-22 pada berbagai temperatur *approach*

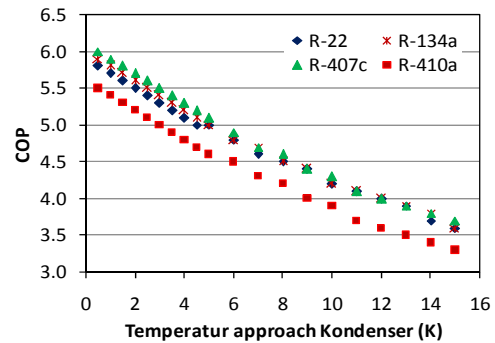
Pada temperatur *approach* evaporator 0.5 K, COP sistem AC *chiller* menurun sampai 27.5% apabila temperatur *approach* kondenser naik dari 0.5 K menjadi 10 K. Penurunan COP akan semakin parah apabila temperatur *approach* kondenser naik di atas 10 K dan temperatur *approach* evaporator juga naik dari 0.5 K.



Gambar 6. Karakteristik konsumsi daya sistem AC *Chiller* dengan refrigeran R-22 pada berbagai temperatur *approach*

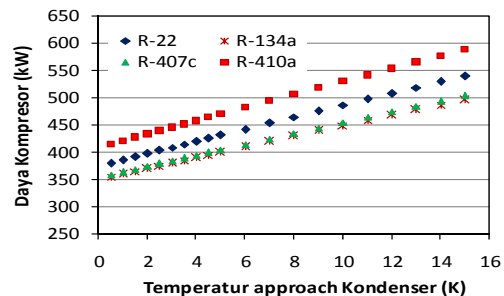
Konsumsi daya sistem AC akan meningkat apabila temperatur *approach* kondenser dan evaporator naik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Konsumsi daya yang disajikan pada gambar, dianalisis pada sistem AC *chiller* dengan kapasitas pendinginan 650 TR (*Ton of Refrigeration*, di mana 1 TR setara dengan 12000 BTU/H). Peningkatan daya bisa mencapai 28% apabila temperatur *approach* kondenser naik sebesar 10 K. Di samping itu, naiknya temperatur *approach* kondenser

ini juga menyebabkan menurunnya kapasitas pendinginan sampai mencapai 7.4%.



Gambar 7. Karakteristik COP sistem AC *Chiller* dengan berbagai refrigeran dan temperatur *approach* kondenser

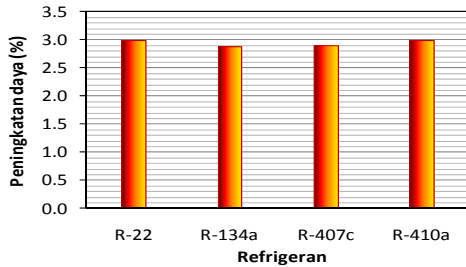
Peningkatan konsumsi daya dan penurunan kapasitas pendinginan mengakibatkan penurunan COP yang sangat signifikan, sehingga menjaga temperatur *approach* kondenser dan evaporator sekecil mungkin menjadi sangat penting untuk mendapatkan kinerja sistem AC tipe *water cooled chiller* tetap optimum.



Gambar 8. Karakteristik konsumsi daya sistem AC *Chiller* dengan berbagai refrigeran dan temperatur *approach* kondenser

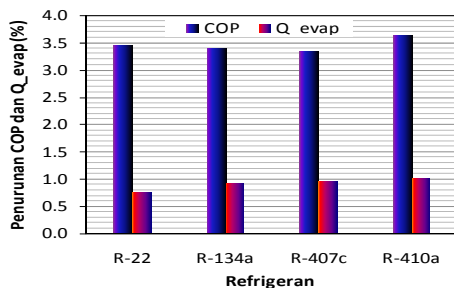
Gambar 7 dan 8 menampilkan karakteristik COP dan konsumsi daya sistem AC *chiller* pada berbagai jenis refrigeran. Hasil tersebut diamati pada temperatur *approach* evaporator 0,5 K. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa efek dari peningkatan temperatur *approach* kondenser terhadap penurunan COP dan peningkatan konsumsi daya lebih besar pada sistem AC *chiller* yang menggunakan refrigeran R-22 dan sebaliknya untuk sistem dengan refrigeran R-134a dan R-407c memiliki dampak yang relatif lebih kecil.

Setiap peningkatan 1 K temperatur *approach* kondenser memberikan dampak peningkatan konsumsi daya sebesar 3%, 2,88%, 2,9% dan 3,0% masing-masing untuk sistem dengan refrigeran R-12, R-134a, R-407c dan R-410a, seperti yang disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Peningkatan konsumsi daya pada sistem AC Chiller dengan berbagai refrigeran pada setiap 1 K kenaikan temperatur approach kondenser

Peningkatan temperatur *approach* kondenser juga berakibat pada penurunan kapasitas pendinginan yang dapat mencapai 1% per 1 K untuk sistem AC dengan refrigeran R-410a, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 10. Pada gambar ini juga dapat diketahui efek dari peningkatan temperatur *approach* kondenser terhadap COP dari sistem *chiller*. Sistem yang diinvestigasi pada empat jenis refrigeran diperoleh penurunan COP berkisar antara 3.3% dan 3.6% per 1 K peningkatan temperatur *approach* kondenser.



Gambar 10. Penurunan COP dan kapasitas pendinginan (Q_{evap}) pada sistem AC Chiller dengan berbagai refrigeran pada setiap 1 K kenaikan temperatur approach kondenser

Dengan demikian temperatur *approach* kondenser dan evaporator merupakan parameter yang sangat berguna untuk memonitor kinerja atau performansi kondenser dan evaporator dan pada akhirnya juga berefek pada kinerja sistem AC secara keseluruhan. Dengan melakukan pencatatan rutin sebagai bagian dari program perawatan, hal ini dapat memberikan peringatan bahwa sisi air dari kondenser maupun evaporator sudah kotor dan telah terjadi penurunan kualitas perpindahan panas pada kedua komponen tersebut. Karena pentingnya parameter ini, York (2010) merekomendasikan untuk menjaga temperatur *approach* kondenser dan evaporator berada di bawah 2 K dan kondenser serta evaporator harus segera dibersihkan apabila temperatur *approach* mencapai 5 K.

IV. KESIMPULAN

Temperatur *approach* kondenser dan evaporator memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap kinerja sistem AC dan merupakan parameter operasi kritis yang sangat bermanfaat untuk

memonitor kinerja sistem AC tipe *water cooled chiller*.

Setiap peningkatan 1 K temperatur *approach* kondenser dan evaporator menyebabkan meningkatkan konsumsi daya sekitar 3% dan penurunan kapasitas pendinginan mencapai 1%.

Sistem yang diinvestigasi dengan berbagai jenis refrigeran R-22, R-134a, R-407c dan R-410a diperoleh penurunan COP berkisar antara 3.3% dan 3.6% per 1 K peningkatan temperatur *approach* kondenser.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Association of Energy Engineers (AEE). "Energy conservation of you need to know, [online]" available at <http://www.aeecenter.org> [accessed 14/02/2014].
- [2] ASHRAE, (2013). *ASHRAE Handbook: Fundamentals*, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- [3] Barry, L. Maka, B.L., Chana, W.W., Li, D., Liua, L., Wonga, K.F. "Power consumption modeling and energy saving practices of hotel chillers", *International Journal of Hospitality Management*, 33: p. 1-5. (2013).
- [4] Biro Pusat Statistik (BPS), (2013). *Selected indicators Social-Economic of Indonesia* [online] available at: <http://www.bps.go.id> [accessed 12/02/2014].
- [5] HAKE, "Program UPLIFT: Upgrading and Leveraging Indonesia to Fortify Energy Efficiency through Academic and Technical Trainings for Energy Management Professionals". (2014).
- [6] Liu, C.W., Chuah, Y.K. "A study on an optimal approach temperature control strategy of condensing water temperature for energy saving, *International Journal of Refrigeration*", 34: p. 816-823. 2011.
- [7] Monfet, D., Zmeureanu, R. "Ongoing commissioning of water-cooled electric chillers using benchmarking models", *Applied Energy*, 92: p. 99-108. 2012.
- [8] York. "Rotary screw liquid chillers: installation, operation & maintenance". 2010.
- [9] Yu, F.W., Chan, K.T. "Improved energy management of chiller systems by multivariate and data envelopment analyses", *Applied Energy*, 92: p. 168-174. 2012.
- [10] Yu, F.W., Chan, K.T. "Improved energy management of chiller systems with data envelopment analysis", *Applied Thermal Engineering*, 50: p. 309-317. 2013.
- [11] Yu, F.W., Chan, K.T., Sit, R.K.Y. "Climatic influence on the design and operation of chiller systems serving office buildings in a subtropical climate", *Energy and Buildings*, 55: p. 500-507. 2012.
- [12] Zhao, X., Yang, M., Li, H. "A virtual condenser fouling sensor for chillers", *Energy and Buildings*, 52: p. 68-76. 2012.