

Pengaruh Debit Udara Kondenser terhadap Kinerja Mesin Tata Udara dengan Refrigeran R410a

Faldian¹, Pratikto², Andriyanto Setyawan³, Daru Sugati⁴

Politeknik Negeri Bandung^{1,2,3}

andriyanto@polban.ac.id

Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta⁴

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan menganalisis kinerja mesin tata udara pada berbagai tingkat debit udara kondenser dan mendapatkan nilai debit yang memberikan kinerja optimum, baik dari segi kapasitas maupun konsumsi energi. Pengujian dilakukan dengan cara mengubah-ubah kecepatan putar kipas kondenser dengan menggunakan inverter tegangan untuk mendapatkan debit udara yang berubah-ubah.

Sasaran utama penelitian terbagi dua, yakni mengkaji pengaruh debit udara kondenser terhadap kinerja mesin dan mendapatkan debit optimum udara kondenser sesuai dengan beban pendinginan mesin yang cenderung berubah-ubah. Kinerja mesin tata udara dinilai dari besarnya kapasitas pendinginan pada evaporator, pembuangan kalor pada kondenser, temperatur evaporasi, temperatur kondensasi, konsumsi energi, koefisien kinerja (coefficient of performance, COP), dan rasio efisiensi energi (energy efficiency ratio, EER).

Pengubahan debit udara kondenser memberikan berbagai pengaruh terhadap kinerja mesin tata udara. Secara umum, dengan mengubah-ubah debit udara kondenser dari 60% hingga 120% maka meningkatkan kapasitas kondenser dari 2777 Watt menjadi 5555 Watt. Kapasitas pendinginan juga naik dari 1653 Watt menjadi 4428 Watt. Demikian pula dengan COP, harga besaran ini naik dari 1.47 menjadi 3.95. Perubahan kecepatan kipas kondenser juga membuat daya kipas berubah-ubah antara 27.6 Watt hingga 55.2 Watt. Setelah analisis dilakukan, penurunan kecepatan kipas kondenser ternyata lebih memberikan penurunan efisiensi yang terlalu banyak dengan pengurangan konsumsi daya yang kecil. Yang lebih disarankan adalah menaikkan debit udara pada kondenser sehingga diperoleh kenaikan kapasitas kondenser, kapasitas pendinginan, dan COP.

Kata Kunci: debit udara condenser, kapasitas pendinginan, kapasitas condenser, COP

1. Pendahuluan

Saat ini mesin tata udara sangat mudah dijumpai pada berbagai aplikasi, khususnya untuk kenyamanan termal manusia. Nilai penjualan mesin tata udara di tingkat dunia diperkirakan mencapai 116 milyar dollar pada tahun 2019 dengan tingkat pertumbuhan 9%. Asia-Pasifik memiliki porsi kurang lebih sebesar 56% dari keseluruhan pangsa pasar atau sebesar 845 triliun rupiah (AHR News, August 18, 2014). Pengkondisian udara di Amerika Serikat menyerap energi listrik kurang lebih 5% dari total seluruh produksi listrik yang ada, atau kira-kira sebesar 5 milyar dollar (65 triliun rupiah) per tahun (US Department of Energy Article, 2012). Bahkan, negara berkembang memiliki pertumbuhan pasar mencapai mencapai 70% dalam 5 tahun atau 14% per tahun (Daikin Corp., 2015). Perkembangan pasar mesin tata udara tentu memerlukan penyediaan sumber energi yang mencukupi. Selain itu, diperlukan pula rekayasa untuk membuat produk mesin tata udara yang lebih hemat energi.

Penggunaan energi pada gedung-gedung komersial untuk keperluan pemanasan, ventilasi, dan tata udara (HVAC, heating, ventilating and air conditioning) rata-rata rata-rata mencapai antara 42% hingga 65%. Konsumsi energi listrik untuk tata udara di Indonesia mencapai kurang lebih 50%

(Karyono dan Bahri, 2005). Karena harga energi semakin mahal, upaya untuk menghemat penggunaan energi pada mesin tata udara sangat diperlukan.

Pada mesin tata udara, komponen yang menggunakan energi listrik adalah kompresor, kipas kondenser, kipas evaporator, dan peralatan kontrol. Konsumsi energi paling besar diserap oleh kompresor. Kondisi lingkungan sangat berpengaruh pada konsumsi energi mesin tata udara.

Jika beban pendinginan pada suatu mesin pendingin/tata udara berubah sesuai dengan kondisi lingkungan, maka dapat muncul masalah yang berkaitan dengan kapasitas pendinginan. Jika beban pendinginan naik secara drastis, kapasitas mesin bisa jadi tidak mampu melayani beban tersebut. Akibatnya, udara ruangan cenderung panas dan lembab. Sebaliknya, jika beban sedang turun terlalu banyak, kapasitas mesin tata udara dapat jauh melebihi beban pendinginan. Akibatnya, ruangan cenderung terlalu dingin. Kedua kondisi tersebut dapat menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna ruangan. Salah satu metode kontrol yang banyak digunakan adalah kontrol ON/OFF untuk kompresor. Kontrol ini menawarkan

penghematan energi, namun dapat menyebabkan kompresor mengalami siklus ON/OFF yang terlalu sering pada saat beban pendinginan sedang rendah. Ini dapat menyebabkan umur mesin menjadi lebih pendek.

Hal tersebut dapat diatasi dengan menggunakan teknologi inverter yang dapat mengubah-ubah putaran kompresor sesuai dengan beban pendinginan. Namun, teknologi ini harganya mahal. Selain itu, pada saat beban kecil dan putaran kompresor rendah, ada kemungkinan oli yang bersirkulasi bersama refrigeran akan tertahan di evaporator sehingga dapat mengurangi efektivitas pertukaran kalor dan kompresor dapat mengalami kekurangan oli. Dengan demikian, hal ini dapat mengurangi kinerja mesin tata udara dan memperpendek umur kompresor.

Metode lain yang belum banyak digunakan untuk mesin ukuran kecil/menengah adalah dengan mengubah-ubah debit udara yang dialirkan ke kondenser. Jika beban pendinginan rendah, debit udara pada kondenser dapat dikurangi dengan cara memperlambat putaran kipas kondenser. Ini akan mengurangi konsumsi energi pada kipas kondenser. Jika beban pendinginan naik, debit udara kondenser dapat ditingkatkan dengan cara mempercepat putaran kipas kondenser untuk mengimbangi peningkatan beban pendinginan.

Teknik ini mudah dan aman dilakukan pada kipas kondenser tidak memerlukan cairan pelumas sebagaimana pada kompresor. Jadi, cara ini lebih aman meskipun digunakan untuk kecepatan putar kipas yang cukup rendah. Resiko yang dihadapi hanyalah turunnya kapasitas kondenser akibat turunnya debit udara. Dengan gambaran di atas, penelitian ini difokuskan pada pengkajian pengaruh debit udara kondenser terhadap kinerja mesin tata udara.

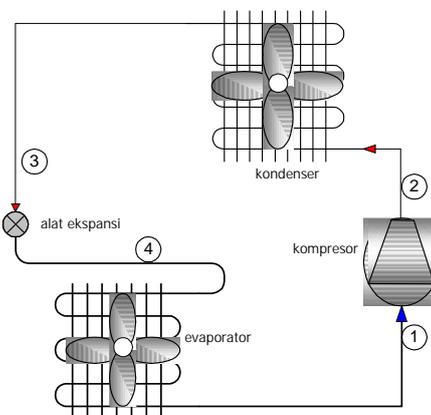
Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh debit udara kondenser terhadap kapasitas pendinginan, kapasitas kondenser, dan koefisien kinerja (COP). Pada penelitian ini, kecepatan kipas kondenser diubah-ubah antara 60% hingga 100% .

2. Metode

Sistem pendingin kompresi uap yang digunakan pada sistem tata udara memiliki prinsip kerja sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 (Arora, 2001; ASHRAE, 2013). Proses-proses yang dialami refrigeran pada siklus pendingin kompresi uap adalah kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi.

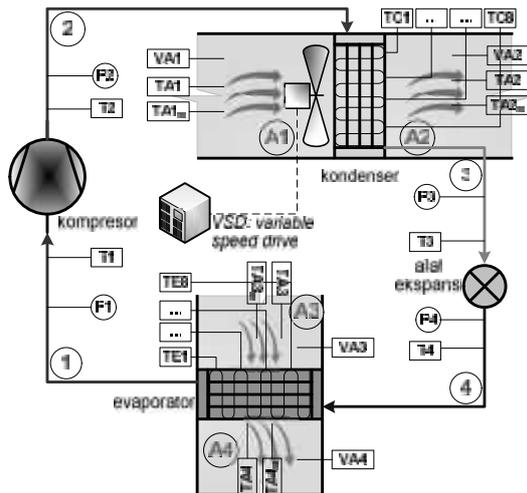
Pada proses kompresi (1-2), uap refrigeran keluaran evaporator (1) mengalami kompresi oleh kompresor sehingga menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi (2). Uap ini selanjutnya akan masuk ke kondenser. Pada proses kondensasi (2-3), refrigeran keluaran kompresor yang memiliki temperatur dan tekanan tinggi (2) didinginkan oleh kondensor.

Proses pendinginan pada kondenser dapat menggunakan fluida pendingin air atau udara. Perpindahan kalor dari refrigeran ke fluida pendingin sampai fasa refrigeran berubah menjadi cair pada tekanan tinggi (3) terjadi pada kondenser. Pada proses ekspansi (3-4), refrigeran cair pada temperatur dan tekanan tinggi (3) akan mengalir melewati alat ekspansi sehingga akan mengalami penurunan tekanan yang diikuti penurunan temperatur. Sebagian refrigeran akan mengalami penguapan, sehingga pada keluaran alat ekspansi (4), fasa refrigeran akan berupa campuran cair dan uap pada temperatur dan tekanan rendah. Proses evaporasi (4-1) terjadi pada evaporator, di mana refrigeran menyerap kalor dari lingkungannya sehingga mengalami pendidihan pada temperatur rendah dan fasanya berubah menjadi uap.

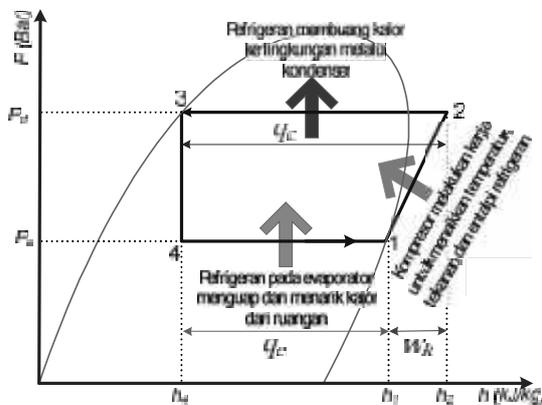


Gambar 1. Sistem Pendingin Kompresi Uap

Pada seluruh rentang pengujian, besaran-besaran tekanan, temperatur, dan kecepatan udara seperti yang terlihat pada Gambar 2 digunakan untuk menganalisis dan mengetahui sejauh mana besaran-besaran tersebut dipengaruhi oleh debit udara kondenser. Selanjutnya, kinerja mesin tata udara seperti efek refrigerasi, kerja kompresor, COP, kapasitas pendinginan, kapasitas pembuangan kalor kondenser, dan rasio efisiensi energi dapat ditentukan dengan mengacu pada Gambar 3 (Arora, 2001; ASHRAE, 2013):



Gambar 2. Skema Peralatan Uji dan Lokasi Pengukuran



Gambar 3. Siklus Refrigerasi pada Mesin Tata Udara yang Digunakan

▪ **Efek refrigerasi**

Berdasarkan pengukuran tekanan temperatur pada saluran masukan dan keluaran evaporator seperti pada Gambar 2 (titik 4 dan 1), maka dapat ditentukan besarnya entalpi spesifik refrigeran pada masukan dan keluaran evaporator dengan menggunakan diagram tekanan-entalpi refrigeran. Efek refrigerasi, atau efek pendinginan (q_e) didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran (h) keluaran dan masukan evaporator. Selanjutnya, efek refrigerasi dihitung dengan

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (1)$$

▪ **Kerja kompresor spesifik**

Dari hasil pengukuran temperatur dan tekanan saluran isap dan buang kompresor (titik 1 dan 2) dapat ditentukan besarnya entalpi spesifik refrigeran masukan dan keluaran kompresor. Kerja spesifik kompresor, w_k , didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran keluaran dan masukan kompresor:

$$w_k = h_2 - h_1 \quad (2)$$

▪ **Pembuangan panas kondenser**

Pembuangan panas oleh kondenser spesifik, q_c , dapat dihitung dengan

$$q_c = h_3 - h_2 \quad (3)$$

di mana h_2 adalah entalpi refrigeran masukan kondenser (atau keluaran kompresor) dan h_3 adalah entalpi refrigeran keluaran kondenser, keduanya dalam satuan kJ/kg.

▪ **COP**

Dari besaran pertama dan kedua dapat dihitung koefisien kinerja (*coefficient of performance, COP*) sistem refrigerasi yang merupakan perbandingan antara efek refrigerasi dengan kerja kompresor

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

▪ **Kapasitas pendinginan**

Besaran ini terdiri atas dua kategori: kapasitas dari sisi refrigeran dan kapasitas dari sisi udara. Kapasitas dari sisi refrigeran dihitung dari hasil kali antara efek refrigerasi dengan laju aliran massa refrigeran. Karena laju aliran volume refrigeran dapat diketahui dari spesifikasi kompresor, maka kapasitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$Q_e = m_r q_e \quad (6)$$

$$m_r = \dots V / v \quad (7)$$

m_r adalah laju aliran massa refrigeran. Volume spesifik refrigeran, v , dapat dicari pada diagram

▪ **Kapasitas kondenser**

Kapasitas kondenser dihitung dengan

$$Q_c = m_r q_c \quad (8)$$

di mana q_c adalah pembuangan kalor spesifik kondenser [kJ/kg] yang merupakan selisih antara entalpi refrigeran masukan dan keluaran kondenser.

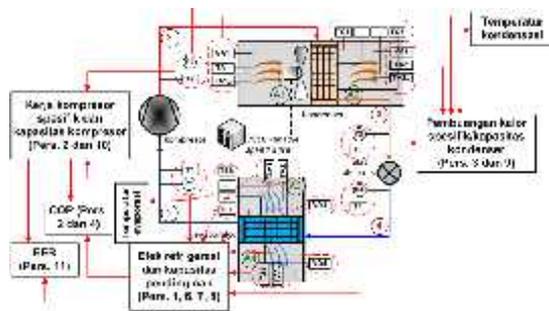
▪ **Kapasitas kompresor**

Kapasitas kompresor (W) dihitung dengan

$$W_k = m_r w_k \quad (9)$$

Besaran w_k , h_1 , h_2 adalah kerja kompresor spesifik, entalpi masukan kompresor, dan entalpi keluaran kompresor yang digunakan juga pada persamaan (2).

Kontribusi masing-masing titik pengukuran pada perhitungan dan analisis data diberikan pada Gambar 3. Sebagai contoh, data P1, T1, P2, dan T2 digunakan untuk menentukan kerja spesifik kompresor dan berkontribusi pada perhitungan kapasitas kompresor. P1, T1, P4, dan T4 digunakan untuk menentukan efek refrigerasi dan berkontribusi pada perhitungan kapasitas pendinginan. COP dapat dihitung setelah efek refrigerasi dan kerja spesifik kompresor diketahui. Untuk mengetahui kapasitas kondenser dari sisi udara, diperlukan kontribusi data VA1, TA1, TA1_w, VA2, TA2, dan TA2_w. Kapasitas evaporator dari sisi udara juga memerlukan data VA3, TA3, TA3_w, VA4, TA4, dan TA4_w. Temperatur kondensasi dan evaporasi memerlukan data TC1 sampai TC8 dan TE1 sampai TE8.



Gambar 4. Kontribusi Masing-masing Titik Pengukuran pada Perhitungan dan Analisis Data Eksperimen

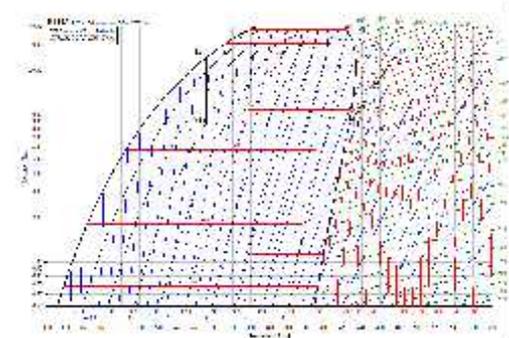
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kinerja mesin tata udara pada kondisi standar, kecepatan 100%.

Kondisi standar ditetapkan dengan temperatur evaporasi 2°C dan temperatur kondensasi 41°C. Siklus refrigerasi pada kondisi standar untuk mesin tata udara yang digunakan diberikan pada Gambar 4. Pada kecepatan putar kipas 100%, atau pada kondisi operasi standar, kipas berputar dengan kecepatan putar 1450 putaran per menit dan mesin tata udara yang digunakan memiliki kapasitas pendinginan nominal sebesar 3512 watt, dengan kapasitas kondenser sebesar 4631 watt. Ini memberikan kerja kompresor sebesar 1119 watt. Pada kondisi operasi standar ini, COP mesin tata udara adalah 3.14. Kondisi ini memberikan nilai entalpi refrigeran masukan evaporator sebesar 272 kJ/kg, entalpi refrigeran keluaran evaporator 425 kJ/kg, dan entalpi refrigeran keluaran kompresor sebesar 474 kJ/kg. Pada saluran buang kompresor, temperatur refrigeran mencapai 77.5°C dan tekanan refrigeran besarnya 24.5 bar. Pada sisi hisap, temperatur refrigeran adalah 2°C dan tekanannya sebesar 8.5 bar. Kinerja mesin tata udara selengkapnya pada kondisi standar ini adalah:

Entalpi keluaran evaporator (h1) : 425 kJ/kg

Entalpi keluaran kompresor (h2) : 474 kJ/kg
Laju aliran refrigeran : 0.0229 kJ/kg
Entalpi keluaran kondenser : 272 kJ/kg
Efek refrigerasi : 153 kJ/kg
Pembuangan panas kondenser : 202 kJ/kg
RPM : 1450 rpm
Kapasitas kondenser : 4629 Watt
Kapasitas pendinginan : 3503 Watt
Daya kipas : 46 Watt
COP' : 3.12
% COP : 100%



Gambar 5. Siklus Refrigerasi pada Mesin Tata Udara pada Kondisi Operasi Standar

3.2. Kinerja mesin tata udara pada kecepatan kipas 90%.

Pada kecepatan kipas 90%, kipas berputar dengan kecepatan 1305 putaran per menit dan menghasilkan kapasitas kondenser sebesar 182 kJ/kg. kondisi selengkapnya untuk kecepatan kipas 90% adalah:

Entalpi keluaran evaporator (h1) : 425 kJ/kg
Entalpi keluaran kompresor (h2) : 474 kJ/kg
Laju aliran refrigerant : 0.0229 kJ/kg
Entalpi keluaran kondenser (h3'=h4') : 292.2 kJ/kg
Efek refrigerasi : 132.8 kJ/kg
Pembuangan panas kondenser : 181.8 kJ/kg
RPM : 1305 rpm
Kapasitas kondenser : 4166 Watt
Kapasitas pendinginan : 3041 Watt
Daya kipas : 41.4 Watt
COP' : 2.71

Terlihat bahwa kinerja mesin mengalami penurunan, menjadi sekitar 87% dari kondisi standar. Dengan demikian, pengurangan kecepatan kipas sebesar 10% menurunkan kinerja mesin tata udara sebesar 13%.

3.3. Kinerja mesin tata udara pada kecepatan kipas 80%.

Pada kecepatan kipas 80%, kipas berputar dengan kecepatan 1160 putaran per menit dan menghasilkan kapasitas kondenser spesifik

sebesar 161.6 kJ/kg. Hasil selengkapnya untuk kondisi kerja ini adalah:

Entalpi keluaran evaporator (h1)	: 425 kJ/kg
Entalpi keluaran kompresor (h2)	: 474 kJ/kg
Laju aliran refrigerant	: 0.0229 kJ/kg
Entalpi keluaran kondenser (h3'=h4')	: 312.4 kJ/kg
Efek refrigerasi	: 112.6 kJ/kg
Pembuangan panas kondenser	: 161.6 kJ/kg
RPM	: 1160 rpm
Kapasitas kondenser	: 3703.2 Watt
Kapasitas pendinginan	: 2578 Watt
Daya kipas	: 36.8 Watt
COP'	: 2.30

Pada kondisi ini terlihat bahwa penurunan kecepatan kipas sebesar 20% menurunkan COP sebesar 26%. Ini berarti kapasitas pendinginan juga turun dengan tingkat yang sama.

3.4. Kinerja mesin tata udara pada kecepatan kipas 70%.

Kecepatan kipas 70% memberikan daya kipas sebesar 32.3 Watt dan kapasitas kondenser sebesar 3240 Watt. Hasil selengkapnya untuk kondisi kerja ini adalah sebagai berikut:

Entalpi keluaran evaporator (h1)	: 425 kJ/kg
Entalpi keluaran kompresor (h2)	: 474 kJ/kg
Laju aliran refrigerant	: 0.0229 kJ/kg
Entalpi keluaran kondenser (h3'=h4')	: 332.6 kJ/kg
Efek refrigerasi	: 92.4 kJ/kg
Pembuangan panas kondenser	: 141.4 kJ/kg
RPM	: 1015 Rpm
Kapasitas kondenser	: 3240 Watt
Kapasitas pendinginan	: 2116 Watt
Daya kipas	: 32.2 Watt
COP'	: 1.89
% COP	: 60%

Terlihat bahwa penurunan kecepatan kipas sebesar 30% menurunkan COP sebesar 40%. Ini berarti kapasitas pendinginan juga turun dengan tingkat yang sama. Penghematan energi yang diperoleh sudah tidak sebanding dengan penurunan kapasitas yang terjadi.

3.5. Kinerja mesin tata udara pada kecepatan kipas 60%.

Setelah kecepatan kipas diturunkan menjadi 60%, daya kipas turun menjadi sebesar 27.6 Watt dan kapasitas kondenser sebesar 2777 Watt. Hasil selengkapnya untuk kondisi kerja ini adalah sebagai berikut:

Entalpi keluaran evaporator (h1)	: 425 kJ/kg
Entalpi keluaran kompresor (h2)	: 474 kJ/kg
Laju aliran refrigerant	: 0.0229 kJ/kg

Entalpi keluaran kondenser (h3'=h4')	: 352.8 kJ/kg
Efek refrigerasi	: 72.2 kJ/kg
Pembuangan panas kondenser spesifik	: 121.2 kJ/kg
RPM	: 870 rpm
Kapasitas kondenser	: 2777 Watt
Kapasitas pendinginan	: 1653 Watt
Daya kipas	: 27.6 Watt
COP'	: 1.47
% COP	: 47%

Dari hasil ini terlihat bahwa kecepatan kipas kondenser 60% menyebabkan kapasitas pendinginan turun menjadi 1653 Watt, yang berarti turun 53%, sebagaimana penurunan COP. Kondisi ini lebih mempertegas bahwa penurunan kecepatan kipas sampai menjadi 60% malah cenderung menurunkan efisiensi terlalu banyak.

4. Kesimpulan

Pengubahan debit udara kondenser memberikan berbagai pengaruh terhadap kinerja mesin tata udara. Secara umum, dengan mengubah-ubah debit udara kondenser dari 60% hingga 120% maka meningkatkan kapasitas kondenser dari 2777 Watt menjadi 5555 Watt. Kapasitas pendinginan juga naik dari 1653 Watt menjadi 4428 Watt. Demikian pula dengan COP, harga besaran ini naik dari 1.47 menjadi 3.95. Perubahan kecepatan kipas kondenser juga membuat daya kipas berubah-ubah antara 27.6 Watt hingga 55.2 Watt. Setelah analisis dilakukan, penurunan kecepatan kipas kondenser ternyata lebih memberikan penurunan efisiensi yang terlalu banyak dengan pengurangan konsumsi daya yang kecil. Yang lebih disarankan adalah menaikkan debit udara pada kondenser sehingga diperoleh kenaikan kapasitas kondenser, kapasitas pendinginan, dan COP.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Kementerian Riset dan Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Politeknik Negeri Bandung, dan Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- AHR News, Global A/C Market Starting to Warm Up, BSRIA World Air Conditioning Market Trends Reveal Increased Sales Worldwide, August 18, 2014.
- Arora, CP, Refrigeration and Air Conditioning, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 2001.
- Daikin Corp. (www.daikin.com/why_daikin/rise/), Increase in Air Conditioning

Demand in Emerging Countries, diakses pada
8 April 2015

Karyono, T.H & G. Bahri, Energy efficient
strategies for JSX building in Jakarta,
Indonesia, International Conference "Passive
and Low Energy Cooling for the Built
Environment", May 2005, Santorini, Greece

Pottker, G. and Hrnjak, P. S., "Effect of Condenser
Subcooling of the Performance of Vapor
Compression Systems: Experimental and
Numerical Investigation " (2012).
International Refrigeration and Air
Conditioning Conference. Paper 1328.

The Trane Company, Reciprocating Refrigeration,
55 ed., The Trane Company, La Crosse,
Wisconsin, 1990.

US Department of Energy Article, Air Conditioner,
July 1, 2012