

Kajian Pengaruh Kecepatan Putar Kipas Kondenser Terhadap Konsumsi Energi Dan Kapasitas Pendinginan Mesin Tata Udara

Susilawati, Andriyanto Setyawan

Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung
susilawati@polban.ac.id
andriyanto@polban.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kecepatan putar kipas kondenser terhadap konsumsi energi dan kapasitas mesin tata udara. Kecepatan putar kipas pendingin kondenser diatur dengan menggunakan inverter atau variable speed drive. Selain diuji pada kecepatan putar normal (100%), mesin juga akan diuji pada kecepatan putar kipas kondenser antara 60% hingga 120% dari putaran normalnya. Secara umum, penurunan kecepatan putar kipas kondenser menyebabkan kenaikan tekanan discharge, kenaikan temperatur udara keluaran kondenser, kenaikan temperatur udara keluaran evaporator, kenaikan konsumsi daya listrik, dan penurunan kapasitas pendinginan.

Kata Kunci: kapasitas pendinginan, kinerja mesin pendingin, R410a

1. Pendahuluan

Dengan semakin bertambahnya penduduk dan meningkatnya taraf hidup manusia, kebutuhan akan mesin tata udara juga ikut meningkat. AHR News, pada edisi August 18, 2014, memberitakan bahwa pasar industri tata udara di dunia diprediksi mencapai 116 milyar US dollar (atau Rp 1508 triliun) pada tahun 2019. Tingkat pertumbuhan yang dicapai adalah rata-rata 9%. Dari jumlah itu, porsi terbesar dimiliki oleh kawasan Asia-Pasifik, yakni kira-kira 56%. Di negara-negara maju seperti Amerika Serikat, tingkat penggunaan energi listrik yang digunakan untuk pengkondisian udara mencapai 5%, setara dengan pembelanjaan sebesar 5 milyar dollar per tahun (US Department of Energy, 2012). Pertumbuhan pasar mesin tata udara di negara berkembang mencapai 14% per tahun (Daikin Corp., 2015). Besarnya perkembangan pasar mesin tata udara dan refrigerasi tentu harus diantisipasi dengan penyediaan sumber energi dan/atau rekayasa produk yang hemat energi.

Rata-rata porsi penggunaan energi untuk keperluan ventilasi dan pengkondisian udara pada gedung-gedung komersial berkisar antara 42% hingga 65%. Di Indonesia, tingkat penggunaan energi listrik untuk pengkondisian udara mencapai kurang lebih 50% (Karyono dan Bahri, 2005). Karena harga energi semakin mahal, maka diperlukan usaha atau rekayasa yang tepat untuk menghemat penggunaan energi.

Proses-proses yang dialami refrigeran pada siklus pendingin kompresi uap adalah kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi (Arora, 2001; ASHRAE, 2013). Siklus *ideal* sistem pendingin kompresi uap dapat dijelaskan dengan Gambar 2. Dari diagram tersebut dapat dihitung efek refrigerasi, kerja kompresor, dan panas yang dibuang oleh kondenser. Efek refrigerasi, atau efek pendinginan (q_e) didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran (h) keluaran dan masukan evaporator:

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

Kerja spesifik kompresor, w_k , didefinisikan sebagai selisih entalpi refrigeran keluaran dan masukan kompresor:

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

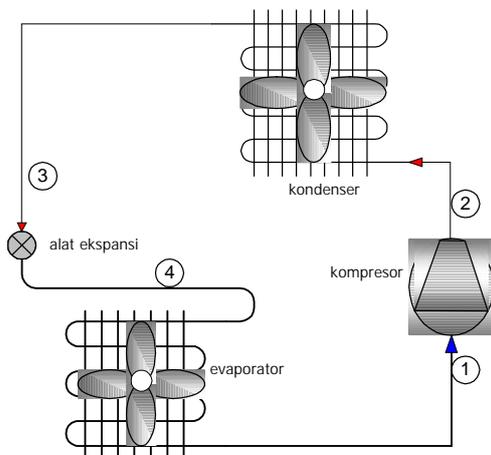
Sementara itu, pembuangan panas oleh kondenser spesifik, q_c , dapat dihitung dengan

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

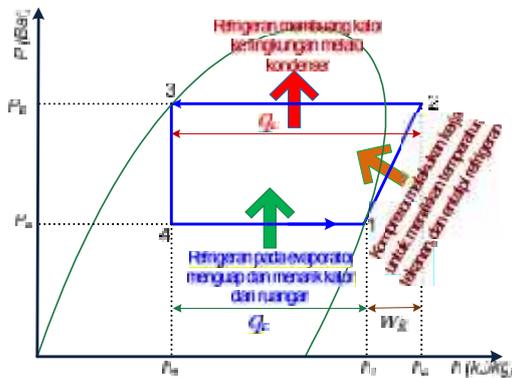
Dari besaran pertama dan kedua dapat dihitung koefisien kinerja (*coefficient of performance*, COP) sistem refrigerasi yang merupakan perbandingan antara efek refrigerasi dengan kerja kompresor

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

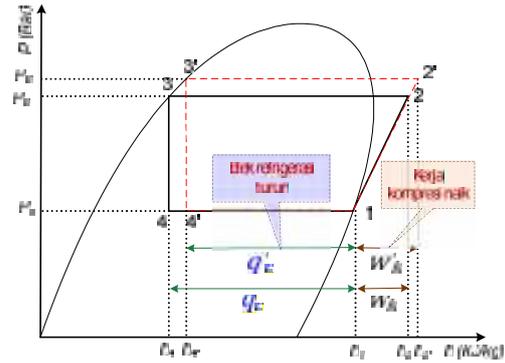
Jika tekanan kondenser naik dan tekanan evaporator konstan maka akan menyebabkan turunnya efek refrigerasi dan naiknya konsumsi daya kompresor (Arora, 2001; ASHRAE, 2013), sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3. Penurunan efek refrigerasi dapat dilihat dari bergesernya titik 4 menjadi 4', sehingga efek refrigerasi berkurang dari $h_1 - h_4$ menjadi $h_1 - h_{4'}$. Selain itu, kerja kompresor akan meningkat dari $h_2 - h_1$ menjadi $h_{2'} - h_1$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Akibatnya, konsumsi daya meningkat. Sebaliknya, jika tekanan kondenser mengalami penurunan, maka efek refrigerasi akan meningkat dan kerja kompresor akan menurun. Konsumsi daya pun akan menurun.



Gambar 1. Sistem pendingin kompresi uap.



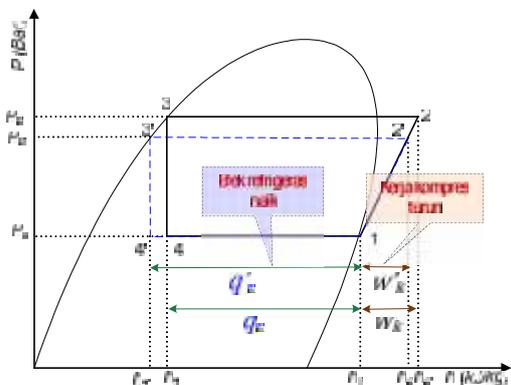
Gambar 2. Siklus termodinamika ideal sistem pendingin kompresi uap.



Gambar 3. Pengaruh kenaikan temperatur dan tekanan kondenser.

Kenaikan efek refrigerasi dapat dilihat dari bergesernya titik 4 ke 4', sementara penurunan kerja kompresor dapat dilihat dari bergesernya titik 2 ke 2' sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

Mengingat besarnya porsi energi yang digunakan pada mesin pendingin/tata udara, berbagai upaya telah dilakukan untuk menghemat konsumsi energi. Metode ini dapat berupa penggunaan penukar kalor pada saluran cair dan isap yang dikenal dengan *liquid-suction heat exchanger/LSHX*, *precooling* udara luar, *precooling* refrigeran pada saluran buang kompresor, variasi temperatur evaporator, variasi kecepatan putar kompresor, aplikasi kontrol otomatis, dan lain-lain.



Gambar 4. Pengaruh penurunan temperatur dan tekanan kondenser.

Studi penggunaan *LSHX* pertama kali dikaji oleh Bivens (1994). Penghematan yang dapat diperoleh berkisar antara 2% hingga 5%. Namun, aplikasi ini hanya sesuai untuk aplikasi temperatur rendah.

Variasi kecepatan kompresor untuk menghemat energi telah dikaji oleh Alkan dan Hosoz (2010). Mereka mengklaim bahwa penggunaan inverter dapat menghemat konsumsi energi antara 12% hingga 25%. Namun Shao dkk. (2004) menyatakan bahwa koefisien kinerja (*coefficient of performance, COP*) justru turun apabila kompresor

bekerja pada putaran di atas atau di bawah putaran normalnya.

Kajian penghematan energi dengan precooling juga telah dilakukan oleh banyak peneliti. Khan dan Zubair (2000) menyatakan bahwa kinerja mesin meningkat sebesar 7.5% dengan menggunakan *precooler*. Meskipun terlihat menjanjikan, namun aplikasi ini lebih sesuai untuk mesin berkapasitas menengah sampai besar.

Aplikasi kontrol otomatis yang terintegrasi dengan sistem manajemen gedung juga menjanjikan penghematan energi yang signifikan. Namun demikian, teknik ini membutuhkan biaya mahal dan lebih sesuai untuk mesin dengan kapasitas tinggi.

Metode lain yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi mesin tata udara adalah dengan mengatur debit udara pada kondenser untuk mendapatkan konsumsi daya minimum dengan kapasitas pendinginan yang memadai sesuai dengan beban pendinginan yang harus dilayani oleh mesin. Tidak seperti metode-metode lainnya, metode ini dapat diterapkan pada mesin tata udara berkapasitas kecil sehingga amat praktis diterapkan pada mesin pendingin ruangan domestik atau yang lebih dikenal dengan sebutan AC split.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan variasi konsumsi daya dan kapasitas pendinginan sesuai dengan variasi putaran kipas kondenser.

2. Metode

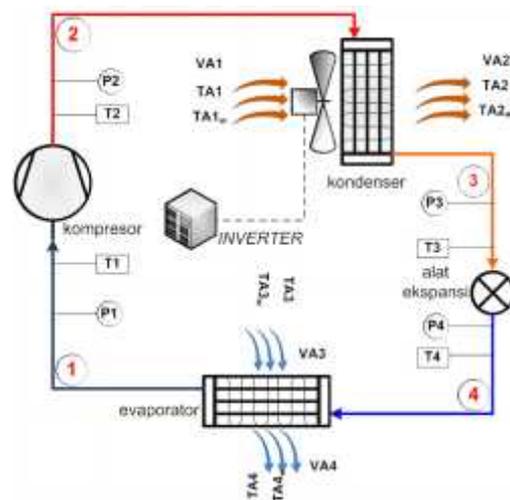
Pada penelitian ini dilakukan studi eksperimen terhadap mesin tata udara berkapasitas 12000 Btu/h. Pada tahap pertama, dilakukan eksperimen dengan mengubah-ubah debit udara pada kondenser dengan menggunakan *VSD (variable speed driver)*. Kecepatan kipas diatur untuk mendapatkan debit udara mulai dari 60% hingga 120% dari nilai normalnya. Selanjutnya dilakukan analisis pengaruh debit udara kondenser terhadap kapasitas pendinginan, konsumsi daya, dan efisiensi energi. Data temperatur dan tekanan ditambah dengan pengukuran pada delapan segmen pada pemipaan kondenser dan evaporator untuk mengkaji pengaruh debit udara kondenser terhadap kondisi kerja mesin. Pengambilan data akan dilakukan pada titik-titik sebagaimana terdapat pada Gambar 5.

Temperatur refrigeran diukur dengan menggunakan termokopel tipe K. Pengukuran dilakukan pada titik-titik T1 sampai dengan T4. Temperatur udara pada sisi masukan dan keluaran kondenser diukur dengan sensor TA1 dan TA2. Temperatur tabung basah diukur oleh sensor TA1_w dan TA2_w. Untuk mengukur temperatur tabung

basah, sensor dibalut dengan kain katun bersih yang dibasahi dengan aquades. Temperatur kondensasi dan evaporasi ditentukan dengan mengukur temperatur pada berbagai posisi pada pipa kondenser (TC1 sampai TC8) dan evaporator (TE1 sampai TE8). Kecepatan udara pada sisi masukan dan keluaran kondenser dan evaporator (VA1 sampai VA4) diukur dengan hotwire anemometer atau anemometer baling-baling. Arus dan tegangan listrik pada kompresor dan kipas-kipas kondenser dan evaporator diukur dengan multimeter. Selanjutnya, daya dan energi listrik diukur dengan wattmeter dan kWh meter. Beda tekanan refrigeran pada masukan dan keluaran kompresor, kondenser dan evaporator diukur dengan pressure gauge. Kecepatan putar kipas kondenser diukur dengan *digital tachometer*.

Pada seluruh rentang pengujian, besaran-besaran tekanan, temperatur, dan kecepatan udara seperti yang terlihat pada Gambar 7 digunakan untuk analisis untuk mengetahui sejauh mana besaran-besaran tersebut dipengaruhi oleh debit udara kondenser. Kinerja mesin tata udara seperti efek refrigerasi, kerja kompresor, COP, kapasitas pendinginan, kapasitas kondenser, dan EER dapat ditentukan dengan menggunakan uraian berikut (Arora, 2001; ASHRAE, 2013):

Efek refrigerasi: Berdasarkan pengukuran tekanan dan temperatur pada saluran masukan dan keluaran evaporator seperti pada Gambar 1 (titik 4 dan 1), maka dapat ditentukan besarnya efek refrigerasi (persamaan 1).



Gambar 5. Lokasi pengukuran pada objek penelitian.

Kerja kompresor spesifik: Kerja kompresor spesifik dapat dihitung dengan persamaan (2) memanfaatkan data pengukuran temperatur dan tekanan pada titik 1 dan 2.

COP: COP dihitung dengan menggunakan persamaan (3).

Kapasitas pendinginan: Kapasitas dari sisi refrigeran dapat dihitung dengan hubungan

$$Q_e = \dot{m}_r q_e \quad (6)$$

$$\dot{m}_r = \dots V = V / \epsilon \quad (7)$$

\dot{m}_r adalah laju aliran massa refrigeran. Volume spesifik refrigeran, v , dapat dicari pada diagram tekanan entalpi dan laju aliran volume atau *swept volume* dapat dicari pada spesifikasi kompresor.

Dari sisi udara, kapasitas pendinginan dihitung dengan menggunakan hubungan

$$Q_e = \dot{m}_a (h_{ea,out} - h_{ea,in}) \quad (8)$$

di mana $h_{ea,out}$ dan $h_{ea,in}$ adalah entalpi udara keluaran dan masukan evaporator dan \dot{m}_a adalah laju aliran massa udara yang dapat dihitung dari hasil kali massa jenis udara, kecepatan udara, dan luas penampang keluaran evaporator. Entalpi udara dapat ditentukan dari diagram psikrometri.

Kapasitas kondenser: Kapasitas kondenser dihitung dengan

$$Q_c = \dot{m}_a (h_{ca,out} - h_{ca,in}) \quad (9)$$

di mana $h_{ca,out}$ dan $h_{ca,in}$ adalah entalpi udara keluaran dan masukan kondenser dan \dot{m}_a adalah laju aliran massa udara yang dapat dihitung dari hasil kali massa jenis udara, kecepatan udara dan luas penampang kondenser.

Kapasitas kompresor: Kapasitas kompresor (W) dihitung dengan

$$W = \dot{m}_r w_k = \dot{m}_r (h_2 - h_1) \quad (10)$$

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

Rasio efisiensi energi: Besaran ini merupakan perbandingan antara kapasitas pendinginan dengan konsumsi daya listrik total dari kompresor, kipas, komponen kontrol, dan rugi-rugi daya (Li dan Zhao, 2008), atau

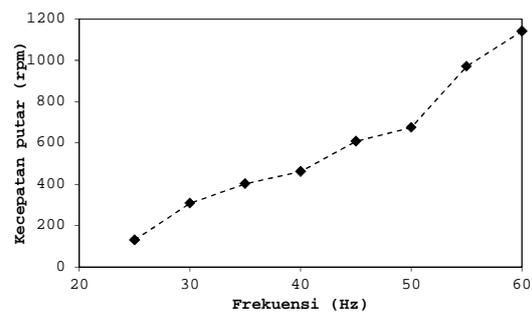
$$EER = \frac{Q_e}{P_{total}} = \frac{Q_e}{\sum P} \quad (11)$$

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. Debit udara ditentukan dari pengukuran kecepatan

udara dan luas penampang koil. 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. Data konsumsi daya mesin dapat diperoleh dari pengukuran dengan wattmeter atau kWh meter.

3. Hasil dan Pembahasan

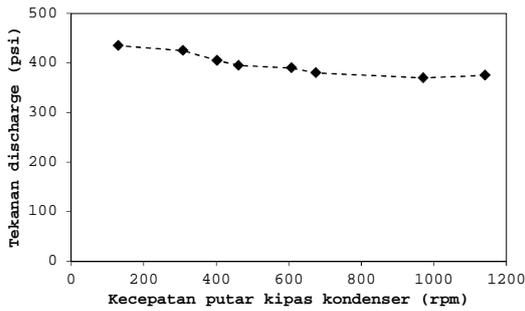
Eksperimen untuk mengetahui pengaruh putaran kipas kondenser terhadap kondeisi kerja dan kinerja mesin tata udara telah dilakukan. Pada eksperimen ini, kecepatan putar kipas diatur dengan menggunakan VSD (*variavle speed drive*) dengan cara mengatur frekuensi sumber daya listrik kipas 25 Hz hingga 60 Hz dengan kenaikan 5 Hz. Besarnya kecepatan putar hasil dari pengaturan frekuensi diberikan pada Gambar 6. Kecepatan putar terendah yang dihasilkan adalah 130 rpm, sedangkan kecepatan tertinggi adalah 1141 rpm.



Gambar 6. Kecepatan putar kipas kondenser hasil dari pengaturan frekuensi dari 25 Hz sampai 60 Hz.

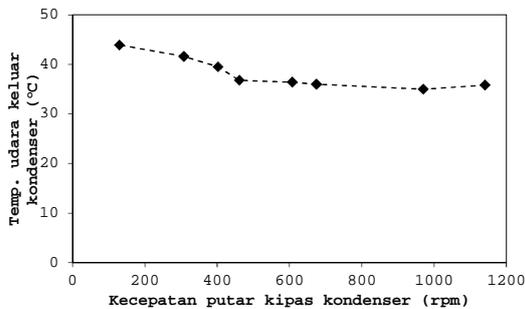
Besarnya kecepatan putar kipas mempengaruhi tekanan buang (*discharge*) pada sistem pendingin. Selain itu, kecepatan putar kipas juga mempengaruhi temperatur udara keluaran kondenser, temperatur udara keluaran evaporator, dan daya input kompresor (Gambar 7 sampai 10).

Gambar 7 memperlihatkan nilai tekanan discharge pada berbagai harga kecepatan putar kipas. Dari gambar ini terlihat bahwa berkurangnya kecepatan putar kipas kondenser menyebabkan terjadinya kenaikan pada tekanan discharge. Hal ini tentu saja akan menaikkan rasio kompresi dari kompresor yang digunakan pada mesin pendingin. Akibatnya, kerja kompresi yang harus dilakukan oleh kompresor bertambah besar, karena kompresor harus bekerja lebih keras untuk menaikkan tekanan refrigeran.



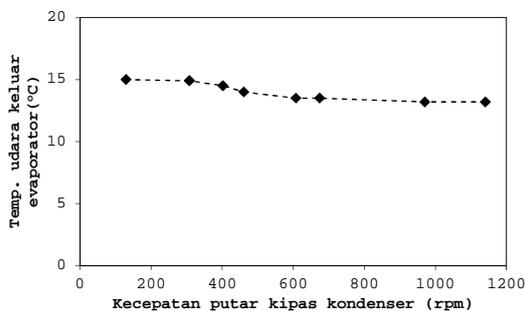
Gambar 7. Pengaruh kecepatan putar kipas terhadap tekanan discharge.

Gambar 8 menunjukkan pengaruh kecepatan putar kipas kondenser terhadap temperatur udara yang keluar kondenser. Secara umum dapat dikatakan bahwa semakin rendah kecepatan putar kipas kondenser, semakin tinggi temperatur udara yang keluar dari kondenser. Ini merupakan indikasi bahwa pada kecepatan putar kipas yang rendah, debit udara pada kondenser juga rendah, sehingga mengakibatkan kenaikan temperatur udara yang tinggi.



Gambar 8. Pengaruh kecepatan putar kipas terhadap temperatur udara keluaran kondenser.

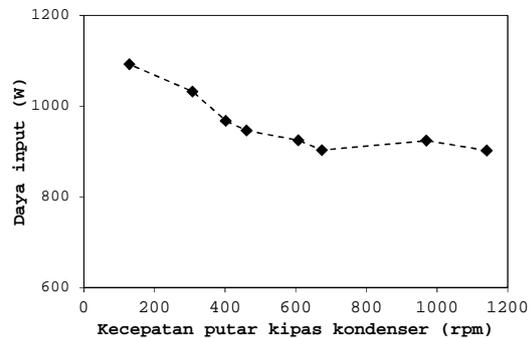
Jika kecepatan kipas kondenser diturunkan, temperatur udara keluaran evaporator cenderung naik (Gambar 9). Ini mengindikasikan bahwa penurunan kecepatan kipas kondenser menyebabkan penurunan kemampuan mesin untuk mendinginkan udara.



Gambar 9. Pengaruh kecepatan putar kipas terhadap temperatur udara keluaran evaporator.

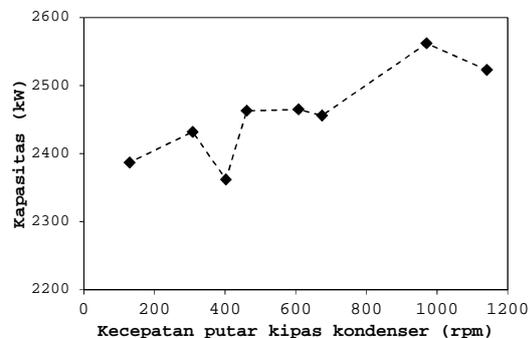
Meskipun dapat menghemat daya input pada kipas kondenser, penurunan kecepatan kipas menyebabkan kenaikan konsumsi daya pada kondenser. Hal ini terlihat pada kurva pada Gambar 10. Terdapat kenaikan daya input yang

cukup signifikan pada saat rpm kipas diturunkan sampai 600. Angka rpm sekaligus dapat menjadi batas minimum dalam pengaturan kecepatan putar kipas kondenser.



Gambar 10. Pengaruh kecepatan putar kipas terhadap daya input kompresor.

Data temperatur udara masuk dan keluar evaporator dapat digunakan untuk menghitung kapasitas pendinginan dari sisi udara. Data temperatur udara tabung kering dan tabung basah udara digunakan untuk menentukan entalpi udara masuk dan keluar evaporator. Debit udara ditentukan dari hasil kali antara luas bukaan outlet evaporator dengan kecepatan udara. Laju aliran massa ditentukan dari hasil kali debit dan massa jenis udara. Selanjutnya, dengan persamaan 8 dapat dihitung kapasitas pendinginan dari sisi udara. Hasil perhitungan kapasitas pendinginan pada sisi udara disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Pengaruh kecepatan putar kipas terhadap kapasitas pendinginan.

Dari Gambar 11 terlihat bahwa kapasitas pendinginan pada berbagai kecepatan putar kipas tidak jauh berbeda, meskipun ada kecenderungan kenaikan kecepatan kipas kondenser menyebabkan kenaikan kapasitas pendinginan.

Kesimpulan

Eksperimen untuk menguji pengaruh kecepatan putar kipas kondenser telah dilakukan dengan mengubah frekuensi catu daya listrik pada kipas kondenser. Kecepatan putar kipas bervariasi dari 130 hingga 1141 rpm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan kecepatan putar

kipas kondenser menyebabkan naiknya tekanan discharge, naiknya temperatur udara keluaran kondenser, naiknya temperatur udara keluaran evaporator, naiknya konsumsi daya pada kompresor, dan turunnya kapasitas pendinginan mesin tata udara.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Politeknik Negeri Bandung yang telah membantu pembiayaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- AHR News, Global A/C Market Starting to Warm Up, BSRIA World Air Conditioning Market Trends Reveal Increased Sales, August 18, 2014.
- Alkan, A., Hosoz, M., Comparative performance of an automotive air conditioning system using fixed and variable capacity compressors, *International Journal of Refrigeration* 33 (2010) 487–495.
- Arora, CP, Refrigeration and Air Conditioning, Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., New Delhi, 2001.
- ASHRAE, ASHRAE Handbook of Fundamental, American Society of Heating, Refrigerating, and Airconditioning Engineers, Atlanta, 2013.
- Bivens, D. B., Allgood, C. C., Shiflett, M. B., Patron, D. M., Chisolm, T. C., Shealy, G. S., Yokozeki, A., Wells, W. D., and Geiger, K. A., HCFC-22 Alternative for Air Conditioners and Heat Pumps, *ASHRAE Transactions*, Vol. 100, No. 2, pp. 566-572, 1994.
- 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
- Khan, J.R., Zubair, S.M., 2000. Design and rating of dedicated mechanical subcooling vapor-compression refrigeration systems. *Proc. IMechEeJ. Power Energy* 214 (A5), 455-471
- Shao, S., Shi, W., Li, X., Chen, H., Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data, *International Journal of Refrigeration* 27 (2004) 805–815.
- US Department of Energy Article, Air Conditioner, July 1, 2012
- [www.daikin.com about/why_daikin/rise/Increase in Air Conditioning Demand in Emerging Countries](http://www.daikin.com/about/why_daikin/rise/Increase%20in%20Air%20Conditioning%20Demand%20in%20Emerging%20Countries), diakses pada 8 April 2015.



BERITA ACARA KEGIATAN SEMINAR NASIONAL ReTII KE-12 TAHUN 2017

Pada hari ini Sabtu, Tanggal 9 Desember, Tahun 2017 telah dilaksanakan Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII) ke-12, atas :

- Nama Pemakalah : Susilawati¹, Andriyanto Setyawan²
 Judul Makalah : KAJIAN PENGARUH KECEPATAN PUTAR KIPAS KONDENSER TERHADAP KONSUMSI ENERGI DAN KAPASITAS PENDINGINAN MESIN TATA UDARA
 Pukul : 10.30 - 10.45
 Bertempat di : Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta
 Dengan alamat : Jln. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, DIY
 Ruang : D.11
 Moderator : Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.
 Notulen : Sigit Budi Hartono, S.T., M.T.

Susunan Acara Seminar ini dibuka oleh Moderator, diikuti oleh Pemaparan Singkat Hasil Penelitian oleh Pemakalah, Tanggapan (Pertanyaan/Kritik/Saran) dari Peserta Seminar dan Tanggapan Pemakalah, dan ditutup kembali oleh Moderator.

Jumlah Peserta yang hadir : _____ orang (Daftar Hadir Terlampir)

Demikian Berita Acara ini dibuat dengan sebenarnya untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 9 Desember 2017

Ketua Panitia	Moderator	Pemakalah
 Dr. Ir. Sugiarto, MT	 Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.	 Susilawati ¹ , Andriyanto Setyawan ²



NOTULEN
KEGIATAN SEMINAR NASIONAL ReTII KE-12 TAHUN 2017

Pada hari ini Sabtu, Tanggal 9 Desember, Tahun 2017 telah dilaksanakan Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII) ke-12, atas :

Nama Pemakalah : Susilawati¹, Andriyanto Setyawan²

Judul Makalah : KAJIAN PENGARUH KECEPATAN PUTAR KIPAS KONDENSER TERHADAP KONSUMSI ENERGI DAN KAPASITAS PENDINGINAN MESIN TATA UDARA

Pukul : 10.30 - 10.45

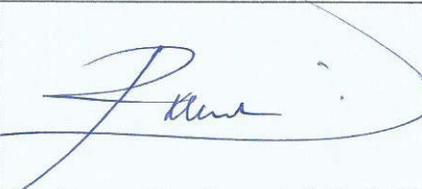
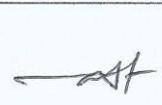
Bertempat di : STTNAS Yogyakarta

Dengan alamat : Jl. Babarsari, Caturtunggal, Depok, Sleman, DIY

Ruang : D.11

Pertanyaan/Kritik/Saran	Tanggapan Pemakalah
<i>1. Apakah putaran di atas normal, seberapa besar pengaruh inverter? (Mangara)</i>	<i>1. Kogus daya kumparan nomok & data kumparan di-putakan.</i>

Yogyakarta, 9 Desember 2017

Ketua Panitia	Moderator	Pemakalah
 Dr. Ir. Sugiarto, MT	 Dr. Ratna Kartikasari, S.T., M.T.	 Susilawati ¹ , Andriyanto Setyawan ²