

Prediksi Penurunan Daya Pompa Akibat Penambahan Bahan Berubah Fasa Pada Refrigeran Sekunder Sistem Pengondisian Udara Jenis *Chilled Water*

Muhammad Irsyad^[1], Aryadi Suwono^[2], Yuli S. Indartono^[2]

^[1]Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung

^[2]Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung

Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung

E-mail : irsyad71@yahoo.com

Abstrak

Penggunaan sistem pengondisian udara (*air conditioning*, disingkat AC) terus meningkat setiap tahun seiring dengan peningkatan kebutuhan kenyamanan ruangan. Hal ini berdampak pada peningkatan kebutuhan energi listrik. Komsumsi energi listrik terbesar pada bangunan khususnya bangunan komersil adalah penggunaan AC yakni berkisar antara 47% sampai 65%. Pemanfaatan bahan berubah fasa (*phase change material*, disingkat PCM), merupakan salah satu cara yang dikembangkan saat ini untuk menurunkan komsumsi energi listrik pada AC sistem *chilled water*. PCM digunakan sebagai bahan pencampur refrigeran sekunder. Pemanfaatan panas laten PCM sebagai penyimpan energi termal dapat meningkatkan densitas termal refrigeran sekunder. Peningkatan densitas termal dapat menurunkan volume refrigeran sekunder yang dibutuhkan. Penurunan volume refrigeran sekunder akan berdampak pada pemilihan daya pompa. Salah satu dasar pemilihan PCM adalah temperatur leleh dan bekunya berada pada temperatur kerja evaporator *chiller* yakni berkisar antara 5°C sampai 12°C. Dengan melihat temperatur leleh, bahan seperti n-tetradecane, n-pentadecane, dan formic acid, dapat dijadikan kandidat PCM untuk aplikasi sistem *chilled water*. Dari data sifat termofisik dan kerapatan bahan tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk memprediksi penurunan daya pompa yang dibutuhkan untuk mengalirkan refrigeran sekunder. Penambahan PCM pada refrigeran sekunder dengan kapasitas pendinginan yang sama dapat mengurangi volume refrigeran sekunder. Peningkatan konsentrasi PCM pada refrigeran sekunder akan memperbesar pengurangan volume refrigeran sekunder. Dengan berkurangnya volume refrigeran sekunder maka debit aliran juga turut berkurang sehingga daya pompa yang dibutuhkan akan semakin kecil.

Keywords: bahan berubah fasa, panas laten, *chilled water*, refrigeran sekunder, daya pompa

Pendahuluan

Penggunaan sistem pengondisian udara (*air conditioning* disingkat AC) menjadi kebutuhan yang tidak terelakan saat ini. Hal ini didukung oleh keinginan manusia mendapatkan suhu ruangan yang nyaman untuk bekerja dan istirahat. Standar kenyamanan ruangan bagi penghuni menurut acuan yang diberikan pada SNI 03-6390-2000 adalah; temperatur bola kering 25°C ± 1 °C dan kelembaban relatif 60% ± 10% [1]. Sedangkan temperatur udara untuk kenyamanan bekerja di Indonesia, yaitu berkisar pada 26,7°C [2]. Penggunaan AC sangat berpengaruh pada peningkatan komsumsi energi listrik, karena komsumsi energi listrik AC cukup besar, sebagai contoh pada bangunan komersil komsumsi energi listrik terbesar adalah penggunaan AC yakni berkisar antara 47 – 65%. [3].

Salah satu upaya efisiensi penggunaan energi listrik pada AC sistem *chilled water* yang dikembangkan saat ini adalah dengan penambahan bahan berubah fasa (*phase change material* disingkat PCM) pada refrigeran sekunder. Bahan ini menggunakan proses perubahan fasa sebagai penyimpan energi termal. Dengan nilai panas laten PCM yang jauh lebih tinggi dari panas sensibel air densitas termal refrigeran sekunder dapat meningkat. Berbagai penelitian sudah dilakukan, mulai dari sifat termo fisik, karakteristik aliran dan perpindahan panas, serta aplikasi pada AC sistem *chilled water*. Penggunaan PCM memberikan dampak positif pada peningkatan COP harian dan penurunan komsumsi energi listrik, seperti penggunaan *trimethiloethane* (TME) dapat meningkatkan COP harian sebesar 43,3% [4], dan *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chltrate hydrate* dapat menurunkan komsumsi energi listrik sebesar 42% [5].

Dalam pemilihan PCM sebagai bahan pencampur

refrigeran sekunder pada sistem pengkondisian udara jenis *chilled water*, perlu memperhatikan kriteria berikut ini [6]:

1. Memiliki temperatur perubahan fasa pada rentang 5°C sampai 12°C dengan tekanan mendekati tekanan atmosfer
2. Panas fusi yang besar, sehingga membantu untuk mencapai densitas termal yang tinggi dibandingkan dengan menggunakan panas sensibel serta mendapatkan tangki penyimpanan yang lebih kompak
3. Perubahan fasa yang terjadi secara berulang pada siklus penyimpanan dan pelepasan energi termal, tidak mengurangi kinerja dan sifat termalnya
4. Konduktivitas termal yang baik, sehingga mempercepat laju perubahan fasa, dan mengurangi supercooling
5. Memiliki sifat kimia yang stabil, korosivitas rendah, dan dampak lingkungannya rendah, seperti potensi perusakan ozon (*Ozone Depletion Potential/ ODP*) nol dan Potensi Pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) yang rendah
6. Viskositas rendah, serta memiliki karakteristik aliran dan perpindahan panas untuk PCM *slurry* yang baik
7. Manufaktur mudah dan memiliki harga yang relatif murah

Dari data hasil penelitian, berdasarkan criteria di atas, khususnya range temperatur lelehnya, dapat dipilih bahan sebagai PCM untuk pencampur refrigeran sekunder. Senyawa organik yang dapat digunakan diantaranya adalah *n-tetradecane*, *n-pentadecane* [7][8][9][10], dan *trimethylolethane* (TME) [11] dari kelompok paraffin campuran minyak nabati seperti minyak kelapa, minyak sawit, dan minyak biji jarak [12] formic acid [9] dari kelompok asam lemak. Sedangkan bahan dari senyawa inorganik yang dapat digunakan diantaranya adalah *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chltrate hydrate*, *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chltrate hydrate* $\text{LiCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, dan $\text{ZnClO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dari garam hidrat.

Dalam pemilihan bahan sebagai kandidat PCM sebagai pencampur refrigeran sekunder, selain temperatur leleh dan beku, perlu diketahui sifat-sifat bahan yang lainnya. Sifat termo fisik seperti panas laten, panas sensibel, konduktivitas termal sangat penting untuk mengetahui kapasitas panas yang bisa dibawa refrigeran sekunder dan

kemampuan perpindahan panas. Kerapatan dan viskositas sangat penting untuk kemampuan mengalirkan refrigeran.

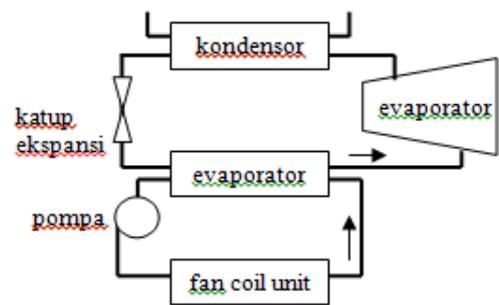
Metode

Prediksi penurunan konsumsi energi listrik pada pompa refrigeran sekunder dilakukan dengan cara perhitungan. Sebagai acuan adalah AC sistem *chilled water* dengan refrigeran sekundernya air. Data teknis chiller sistem *chilled water* yang digunakan adalah sebagai berikut; temperatur refrigeran sekunder masuk dan keluar evaporator chiller 12°C dan 5°C, serta laju aliran refrigeran sekunder 60 l/s. Sedangkan bahan berubah fasa yang digunakan dalam perhitungan adalah sebagai berikut;

Tabel 1. Sifat bahan untuk aplikasi pada sistem *chilled water*

| PCM | T_m (°C) | ρ (kg/m ³) | Δh_{latent} (kJ/kg) | C_p (kJ/kg) | ν (cSt) |
|---------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------|
| Air | 0.0 | 1000 | | 4.186 | 1.00 |
| n-tetradecane | 6.0 | 760 | 230 | 2.400 | 2.17 |
| n-pentadecane | 6.8 | 770 | 212 | 2.400 | 2.71 |
| Formic acid | 7.8 | 1220 | 247 | 2.198 | 1.50 |

Mengacu pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan oleh air sebagai refrigeran sekunder, maka dilakukan prediksi penurunan debit aliran dan daya pompa dan kenaikan faktor gesek aliran pada saluran untuk masing-masing PCM dengan konstansi pada refrigeran sekunder sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, 25% dan 30%. Skema sistem pengondisina udara sistem *chilled water* seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema AC sistem *chilled water*

Hasil dan Pembahasan

Kapasitas pendinginan yang yang dihasilkan oleh air sebagai refrigeran sekunder dihitung dari persamaan;

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \Delta T \quad \dots (1)$$

Penambahan PCM pada refrigeran sekunder pada proses pendinginan akan mengalami perubahan fasa dari cair ke padat. Kapasitas pendinginan yang dihasilkan dapat dihitung dengan menghitung setiap fasa yang dilaluinya,

dengan persamaannya sebagai berikut;

$$\dot{Q} = (\dot{m}c_p\Delta T)_{PCM\ cair} + (\dot{m}L_f)_{PCM} + (\dot{m}c_p\Delta T)_{PCM\ padat} + (\dot{m}c_p\Delta T)_{air} \quad \dots (2)$$

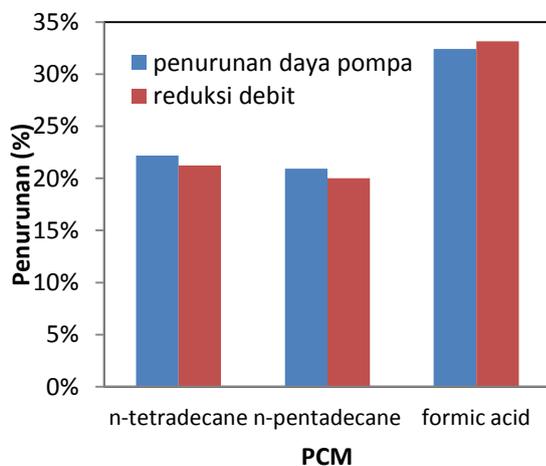
Penurunan debit dan daya pompa

Penambahan PCM pada refrigeran sekunder dapat menurunkan debit aliran. Nilai panas laten cukup besar disbanding panas sensibel air memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap penurunan massa refrigeran yang dibutuhkan. Dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 penurunan debit aliran untuk masing-masing PCM dengan variasi penambahannya. Penurunan debit aliran didapat dari selisih debit aliran dengan menggunakan air dengan debit aliran dengan penambahan PCM.

Daya pompa yang dibutuhkan dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 3. Penurunan daya pompa merupakan selisih antara daya pompa untuk air dengan daya pompa untuk PCM + air. Asumsi dalam perhitungan ini adalah pompa dengan efisiensi, dan head pompa sama.

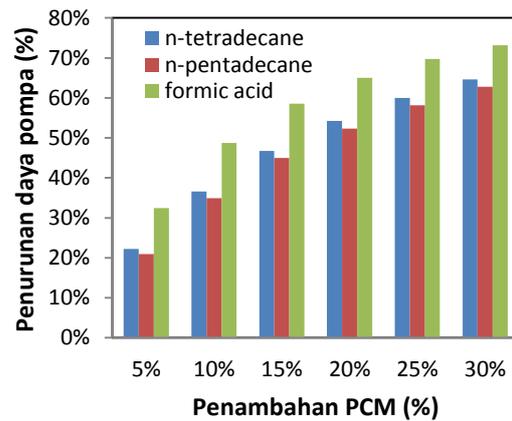
$$P_{pompa} = \rho Q g H / \eta \quad \dots 3$$

Gambar 2 memperlihatkan bahwa penambahan PCM dapat mengurangi debit aliran dan daya pompa yang dibutuhkan. Penurunan debit dan daya pompa berbanding lurus dengan panas laten dan berbanding terbalik dengan kerapatan yang dimiliki PCM. Penambahan 5% formic acid dapat mengurangi daya pompa sebesar 32.42%. Walaupun kerapatannya diatas kerapatan air, penambahan formic acid masih memberikan penurunan daya pompa terbesar, karena nilai panas latennya jauh lebih tinggi dibandingkan yang lain.



Gambar 2. Penurunan debit dan daya pompa akibat penambahan PCM 5%

Penambahan jumlah PCM pada refrigeran sekunder memberikan dampak pada peningkatan panas yang diserap atau dilepaskannya saat perubahan fasa. Untuk beban pendingin yang sama dengan menggunakan persamaan 2, penambahan jumlah PCM akan mengurangi debit air yang dalirkan. Penambahan PCM 10% sudah mampu menurunkan daya pompa sampai 46%, seperti terlihat pada gambar 3. Walaupun mampu menurunkan debit aliran dan daya pompa dengan penambahan PCM ini, perlu dianalisa kembali perpindahan panas pada evaporator dan *fan coil unit* (FCU). Penurunan debit yang cukup besar untuk perpindahan panas yang sama akan mempengaruhi dimensi *heat exchanger*.



Gambar 3. Pengaruh penambahan PCM terhadap penurunan daya pompa

Penambahan PCM pada refrigeran sekunder harus memperhatikan viskositas bahan berubah fasanya. Viskositas fluida mempengaruhi kinerja pompa. Penggantian fluida kerja dari air ke fluida yang memiliki viskositas yang lebih tinggi perlu memperhatikan faktor koreksi untuk pentuan debit, head pompa dan daya pompa. Faktor koreksi perlu diperhitungkan apabila viskositas fluida lebih dari 5 cSt [13]. Melihat nilai viskositas PCM yang digunakan sebagai bahan pencampur refrigeran sekunder paling tinggi 2.7 cSt, maka faktor koreksi untuk perhitungan pompa dapat diabaikan.

Rugi-rugi aliran

Rugi-rugi aliran pada sistem perpipaan perlu diperhatikan karena berpengaruh pada daya pompa yang dibutuhkan. Faktor gesek merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi rugi-rugi aliran. Untuk aliran air faktor gesek dapat menggunakan diagram Moody. Faktor gesek untuk fluida Newtonian pada aliran turbulen dapat dihitung dengan persamaan Blasius. Indartono, dkk (2006) memperlihatkan faktor gesek hasil pengujian campuran TME dan air dalam kondisi cair dapat didekati dengan persamaan Blasius, sedangkan dalam kondisi slurry lebih

cocok didekati dengan persamaan Thomas [11]. Persamaan Blasius untuk faktor gesek adalah sebagai berikut;

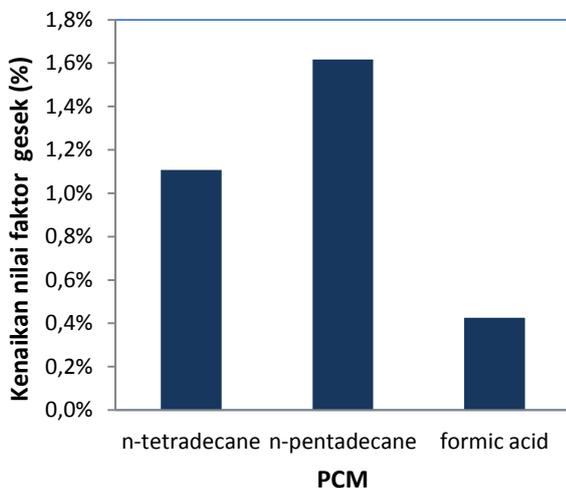
$$f = 0.0791Re^{-0.25} \quad \dots 4$$

dimana;

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \dots 5$$

Pada perhitungan ini PCM yang digunakan memiliki viskositas yang tidak terlalu besar perbedaannya dengan viskositas air. Merujuk pada hasil penelitian indartono dkk (2006) dengan viskositas yang tidak jauh berbeda, maka perhitungan faktor gesek dapat didekati dengan persamaan Blasius.

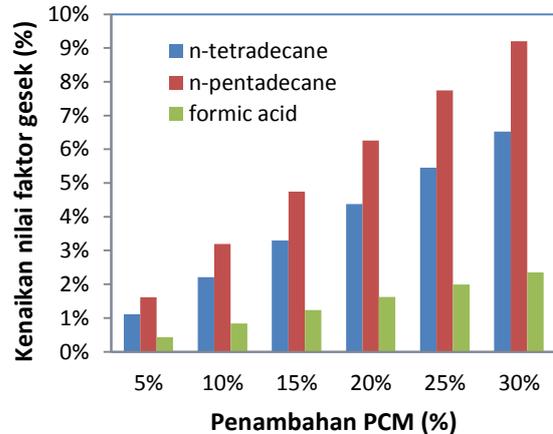
Nilai kenaikan faktor gesek merupakan selisih nilai faktor gesek akibat penambahan PCM dengan nilai faktor gesek untuk air murni sebagai refrigeran sekunder. Untuk sistem perpipaan dan kecepatan yang sama, dengan perhitungan didapat nilai faktor geseknya. Formic acid dengan viskositas yang lebih rendah menghasilkan kenaikan faktor gesek yang paling rendah. Dari data viskositas ketiga bahan ini, dimana nilainya masih mendekati viskositas air, memberikan pengaruh yang tidak terlalu signifikan terhadap kenaikan faktor gesek untuk penambahan PCM 5%. Penambahan PCM sebesar 5% dapat menaikkan faktor gesek sebesar 1.62%, seperti terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Kenaikan faktor gesek akibat penambahan PCM 5%

Konsetrasi PCM pada refrigeran sekunder berpengaruh pada kenaikan nilai faktor gesek, dimana kenaikan nilai faktor gesek berbanding lurus dengan konsetrasi PCM, seperti terlihat pada gambar 5. Bertambahnya konsetrasi PCM akan menaikkan viskositas campuran. Penambahan PCM sampai 30% dapat menaikkan nilai faktor gesek sebesar 9.21% untuk n-pentadecane.

Kenaikan nilai faktor gesek akan memperbesar rugi-rugi aliran. Rugi-rugi aliran akan memberikan dampak pada peningkatan beban pompa sehingga akan menambah daya pompa yang dibutuhkan.



Gambar 4. Pengaruh penambahan PCM terhadap kenaikan faktor gesek

Kesimpulan

Penambahan bahan brubah fasa pada refrigeran sekunder memberikan dampak positif terhadap penurunn daya pompa. Panas laten dan konsentrasi PCM berbanding lurus dengan penurunan daya pompa. Viskositas PCM mempengaruhi kenaikan nilai faktor gesek, dimana nilainya berbanding lurus. Kenaikan viskositas PCM akan menaikkan daya pompa dan untuk nilai viskositas diatas 5 cSt perlu menggunakan faktor koreksi dalam perhitungan.

Nomenklatur

| | |
|-------------|--|
| C_p | panas spesifik (kJ/kg.°K) |
| D | diameter (m) |
| f | faktor gesek |
| g | gravitational constant (ms ⁻²) |
| H | head pompa (m) |
| L_f | panas laten (kJ/kg) |
| \dot{m} | Laju aliran massa (kg/s) |
| P_{pompa} | daya pompa (W att) |
| Q | debit aliran (l/s) |
| \dot{Q} | Laju perpindahan panas (Watt) |
| Re | bilangan Reynolds |
| ΔT | beda temperature (°K) |
| V | Kecepatan aliran (m/s) |

Greek letters

| | |
|--------|--------------------------------|
| η | Efisiensi pompa (%) |
| ρ | Kerapatan (kg/m ³) |
| μ | Viskositas (m ² /s) |

Referensi

1. Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-6390-2000; *Konservasi energi sistem tata udara pada bangunan gedung*, http://sisni.bsn.go.id/index.php?/sni_main/sni/cari_simple, diakses 28 Februari 2013
2. Alfata, M.N.F., Kusumawati, F., 2011, *Standar kenyamanan termal penghuni gedung perkantoran dalam upaya konservasi energi*, Prosiding PPI Standardisasi 2011 – Yogyakarta, 14 Juli 2011, hal 199 – 209
3. Tim Balai Sains Bangunan. 2010, *Laporan Audit Energi Gedung Sumberdaya Air dan Penataan Ruang Kementerian Pekerjaan Umum*. Bandung: Puslitbang Permukiman
4. Indartono, Y.S., Setioputro, N.T., Tandian, N.P., Pasek, A.D., Suwono, A., 2008, *Development of Energy Saving Air Conditioning Sistem by Substituting Primary and Secondary Refrigerants*, Proceeding of International Conference on Cooling and Heating Technologies, Jinhae, Korea, 28-31 October 2008.
5. Hidemasa, O., Shingo, T., 2004, *Air-Conditioning Sistem Using Clathrate Hydrate Slurry*, JFE Technical Report, No. 3
6. Li, G., Hwang, Y., Radermacher, R., 2012, *Review of cold storage materials for air conditioning application*, International Journal of Refrigeration, xxx(20120) I-25
7. Oró, E., Gracia, A., Castell, A., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012, *Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications*, Applied Energy 99 (2012) 513–533
8. Al-Abidi, A.A., Mat, S.B., Sopian, K., Sulaiman, M.Y., Lim, C.H., Abdulrahman, 2012, *Review of thermal energy storage for air conditioning systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5802–5819
9. Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009, *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345
10. Li, G., Hwang, Y., Radermacher, R., 2012, *Review of cold storage materials for air conditioning application*, International Journal of Refrigeration, xxx(20120) I-25
11. Indartono, Y.S., Usui, H., Suzuki, H., Nakayama, K., 2006, *Hydrodynamics and heat transfer characteristics of drag-reduction trimethylolethane solution and suspension by cationic surfactant*, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 39, No. 6, pp 623-632
12. Indartono, Y.S., Usui, H., Suzuki, H., Komoda, Y., Mujahidin, D., 2010, *Hydrodynamics Characteristics of Water Based Mixture of Coconut Oil and FAME-Rich Mixture to be used as Secondary Refrigerant in Air Conditioning System*, Region Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Bali, 9-10,2010
13. Centrifugal pumps Selection and Application into the System, <http://jensapardi.files.wordpress.com/2010/02/centrifugal-pump-manual-12.pdf>, diakses 10 oktober 2013