

Studi Karakteristik Garam Hidrat Sebagai Kandidat Refrigeran Sekunder Pada Sistem Pengkondisian Udara Jenis *Chiller*

M Irsyad^{1,2,a*}, A Suwono^{1,b}, YS Indartono^{1,c}, AD Pasek^{1,d}, WC Mahendra^{1,e}

¹ Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

email: irsyad71@yahoo.com, aryadi@termo.pauir.itb.ac.id, indartono@termo.pauir.itb.ac.id, ari@termo.pauir.itb.ac.id, widyameahendra@gmail.com

Abstrak

Salah satu cara untuk menurunkan konsumsi energi pada sistem pengkondisian udara jenis *chiller* adalah dengan menggunakan bahan berubah fasa (*phase change material*, disngkat PCM) pada refrigerant sekunder. Beberapa PCM seperti *trimethylolethane* (TME), dan *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chlatrate hydrate* menunjukkan hasil yang positif terhadap penurunan konsumsi energi. Namun kendala ketersediaan dan harga, menyebabkan perlu mencari PCM alternatif yang lain. Garam hidrat merupakan PCM yang memiliki panas laten yang tinggi namun perlu diperhatikan korosivitasnya. Dalam penelitian ini PCM yang dikaji adalah garam hidrat dari CaCl_2 , Na_2HPO_4 , dan NaH_2PO_4 . Untuk mengetahui karakteristik termal dilakukan pengujian dengan menggunakan *T-history test*, dan *differential scanning calorimetry* (DSC). Selain itu juga dilakukan uji korosi dengan metoda *immersion test*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran CaCl_2 dan air dengan komposisi 55% : 45% serta campuran Na_2HPO_4 dan air dengan komposisi 10% : 90% memiliki temperatur leleh yang cocok dengan temperatur kerja refrigeran sekunder serta nilai panas laten masing-masing adalah 315.37 kJ/kg dan 215.94 kJ/kg. Pemberian gangguan pada proses pembekuan PCM dapat mengurangi *supercooling*. Laju korosi garam hidrat dari CaCl_2 dan Na_2HPO_4 terhadap material tembaga masih direkomendasikan yakni $2.627 \text{ mg/cm}^2\text{yr}$ dan $2.547 \text{ mg/cm}^2\text{yr}$.

Kata kunci : phase change material, garam hidrat, panas laten, sistem pengkondisian udara

Latar belakang

Peningkatan kebutuhan energi listrik harus diimbangi dengan peningkatan produksi energi dan efisiensi penggunaannya. Efisiensi penggunaan energi sistem pengkondisian udara pada bangunan komersial perlu ditingkatkan karena peralatan ini merupakan pengguna energi terbesar. Di Indonesia, penggunaan energi listrik untuk sektor AC pada gedung menurut penelitian Puslitbang Permukiman SDA Kementerian PU tahun 2010 mencapai 65% [1]. Persentase ini tidak jauh beda dengan hasil penelitian JICA 2008 untuk beberapa jenis bangunan sebagai berikut; hotel 65%, rumah sakit 57%, pusat perbelanjaan 57%, kantor pemerintah 55%, dan bangunan kantor 47% [2]. Salah satu cara yang sedang dikembangkan saat ini untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada sistem pengkondisian udara adalah penambahan PCM pada refrigeran sekunder. Beberapa PCM yang telah dikembangkan, seperti *trimethylolethane* (TME) dapat menaikkan COP sebesar 43,3% [3] dan *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chlatrate hydrate*, dapat menurunkan konsumsi energi sebesar 36% [4]. Namun untuk penerapan

secara komersial di Indonesia masih terkendala pada ketersediaan bahan dan harganya masih relatif mahal [3].

Pemilihan PCM sebagai bahan pencampur refrigeran sekunder pada sistem pengkondisian udara jenis *chilled water*, perlu memperhatikan kriteria berikut ini [5]. Memiliki temperatur perubahan fasa pada rentang 5°C sampai 12°C. Memiliki panas fusi yang besar. Perubahan fasa yang terjadi secara berulang pada siklus penyimpanan dan pelepasan energi termal, tidak mengurangi kinerja dan sifat termalnya. Konduktivitas termal yang baik. Memiliki sifat kimia yang stabil, korosivitas rendah. Viskositas rendah, serta memiliki karakteristik aliran dan perpindahan panas untuk PCM *slurry* yang baik. Manufaktur mudah dan memiliki harga yang relatif murah.

Garam hidrat memiliki nilai panas laten dan konduktivitas termal yang tinggi, namun subcoolingnya tinggi dan memiliki sifat korosive [6,7]. Garam hidrat yang sudah dikembangkan menjadi refrigeran sekunder pada sistem pengkondisian udara jenis chiller seperti *tetra-n-butylammonium bromide* (TBAB) *chlatrate*

hydrate [8,9]. Dari diagram fasa garam hidrat yang terbentuk dari senyawa CaCl_2 [10], Na_2HPO_4 [11], dan NaH_2PO_4 [12] dengan memperhatikan temperatur lelehnya, maka ketiga garam hidrat ini dapat diteliti lebih lanjut sebagai kandidat refrigeran sekunder.

Metodologi

Untuk memilih PCM dari garam hidrat yang dapat dijadikan sebagai kandidat refrigeran sekunder pada sistem pengkondisian udara jenis *chiller* perlu mengetahui sifat-sifat material tersebut. Dalam penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui sifat-sifat material yakni, kerapatan, viskositas, karakteristik termal berupa; temperatur beku dan leleh, panas laten dan panas sensibel, serta laju korosi. Pengujian kerapatan menggunakan picnometer dan timbangan digital. Pengujian viskositas menggunakan viskometer *Ostwald* dan dilakukan pada temperatur lingkungan. Pengujian karakteristik termal menggunakan *T-history test* dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Pengujian DSC menggunakan *Perkin Elmer* tipe 8500. Berat sampel 5-7 mg, laju pendinginan dan pemanasan 2 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ dari 25 sampai $-30\ ^{\circ}\text{C}$ dan pemanasan dari $-30\ ^{\circ}\text{C}$ sampai $35\ ^{\circ}\text{C}$, laju aliran nitrogen pendingin 20 ml/min. Pengujian laju korosi menggunakan metode *Immersion Test*.

Tabel 1. Kerapatan dan viskostias garam hidrat

PCM	Komposisi	Kerapatan (kg/m^3)	Viskositas (cSt)
$\text{CaCl}_2 + \text{Air}$	55% : 45%	1.352	3.893
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Air}$	50% : 50%	1.427	5.52
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{Air}$	10% : 90%	1.269	2.119

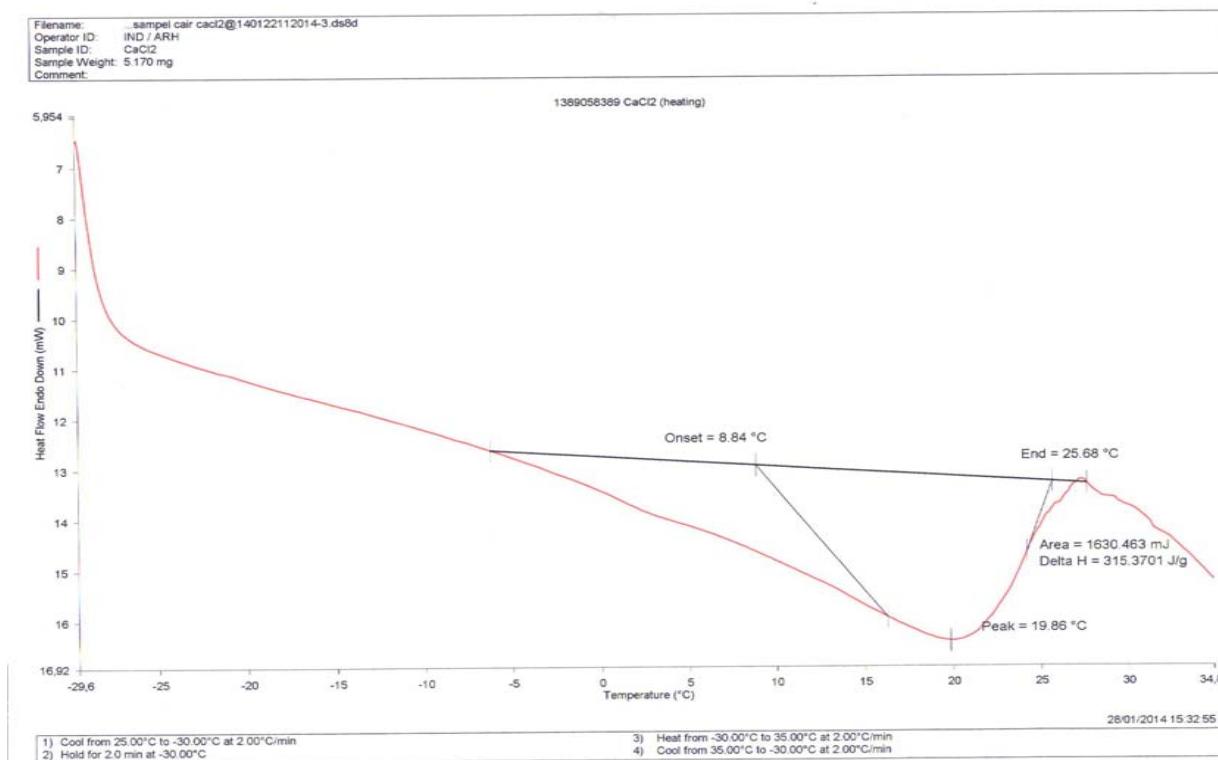
Tabel 2. Hasil pengujian DSC garam hidrat

PCM	Freezing				Melting			
	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{peak} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{endset} ($^{\circ}\text{C}$)	Panas laten (kJ/kg)	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{peak} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{endset} ($^{\circ}\text{C}$)	Panas laten (kJ/kg)
$\text{CaCl}_2 + \text{Air}$	0.08	-1.43	-4.10	319.6	8.81	19.86	25.68	315.37
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{Air}$	-	-	-	-	-20.23	-12.65	-11.33	5.206
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{Air}$	-15.74	-15.93	-16.19	162.20	4.63	6.68	8.47	215.94

Hasil

Penelitian menghasilkan data sifat PCM dari garam hidrat berupa, kerapatan, viskostas, temperatur beku dan leleh, panas laten, konsentrasi massa padatan, serta laju korosi. Nilai kerapatan dan viskostas diperlihatkan pada Tabel 1. Sifat termal dari hasil pengujian DSC ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 1, sedangkan sifat termal dari pengujian *T-history* diperlihatkan pada Tabel 3 dan Gambar 2. Konsentrasi massa padatan pada proses pendinginan dan pemanasan diperlihatkan pada Gambar 3. Laju korosi pada beberapa material diperlihatkan pada Tabel 4.

Kerapatan ketiga garam hidrat ini sedikit lebih tinggi dari kerapatan air, sehingga kebutuhan daya pompa akan bertambah. Nilai viskostas garam hidrat dari CaCl_2 dan Na_2HPO_4 lebih tinggi dari viskostas air dan masih berada dalam range viskostas untuk pengujian Ostwald yakni 0.3 – 10 cSt [13]. Nilai viskostas untuk garam hidrat dari CaCl_2 dan Na_2HPO_4 belum melebihi batas toleransi viskostas dalam perhitungan debit, head dan daya pompa yakni 5 sCt, sehingga tidak perlu menggunakan faktor koreksi [14]. Pengujian viskostas perlu dikembangkan lagi pada beberapa kondisi temperatur terutama pada temperatur kerja refrigeran sekunder.



Gambar 1. Hasil pengujian DSC garam hidrat dari CaCl₂ dan air dengan rasio 55% : 45%

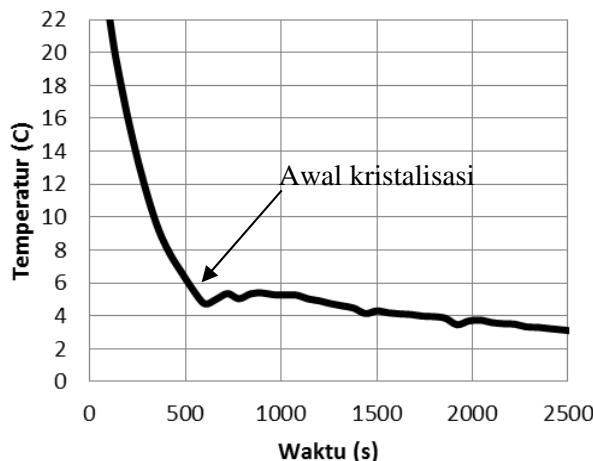
Dari hasil pengujian DSC ketiga garam hidrat tersebut seperti diperlihatkan pada Tabel 2, menunjukkan bahwa pada proses pelelehan, temperatur leleh garam hidrat dari CaCl₂ dan Na₂HPO₄ berada pada range temperatur kerja evaporator *chiller*, dan memiliki nilai panas laten yang tinggi. Sedangkan garam hidrat dari senyawa NaH₂PO₄ dari hasil pengujian DSC temperatur leleh sangat rendah, sehingga tidak cocok untuk diaplikasikan sebagai refrigeran sekunder. Pada proses pembekuan, temperatur pembekuan jauh lebih rendah dibandingkan temperatur pelelehan. Hal ini disebabkan karena terjadi subcooling. Komposisi garam hidrat yang perlihatkan pada Tabel 1 berbeda dengan data yang diambil pada diagram fasa masing-masing garam hidrat. Hal ini disebabkan karena senyawa garam yang digunakan mengandung air 20 – 25%.

Sifat termal dari hasil pengujian dengan metode *T-history* menghasilkan temperatur beku berkisar antara 6.02 °C – 1.26 °C, seperti diperlihatkan pada tabel 3. Pada metode *T-history*, proses pembekuan dan pelelehan dilihat secara visual awal dan akhir proses. Proses pembekuan CaCl₂ + Air diperlihatkan pada Gambar 2.

Tabel 3. Hasil pengujian *T-history*

PCM	Temperatur Pembekuan (°C)
CaCl ₂ + Air	5.36 – 5.26
NaH ₂ PO ₄ + Air	5.33 – 5.12

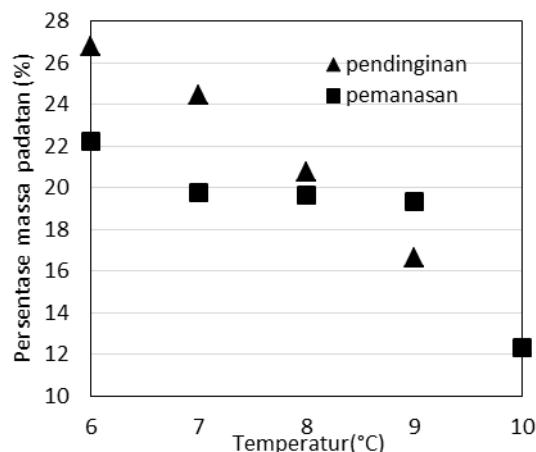
Na₂HPO₄ + Air 6.02 – 1.26



Gambar 2. Proses pembekuan CaCl₂ + Air

Dari hasil pengujian konsentrasi massa padatan pada proses pendinginan, massa padatan sudah terbentuk sebesar 16,612% di temperatur 9°C seperti yang dipelihatkan pada Gambar 3. Ada perbedaan dengan hasil pengujian DSC dimana untuk CaCl₂ hidrat proses pembekuan baru mulai terbentuk pada temperatur 0.08°C, subcooling yang terjadi dapat diminimalkan dengan cara diaduk sehingga pembentukan inti dapat cepat terbentuk. Pada proses pendinginan persentase massa padatan yang terbentuk dari temperatur 9°C sampai 6°C adalah 10.212%. sedangkan pada

proses pemanasan dari temperatur 6°C sampai 10°C, persentase massa padatan yang meleleh adalah 9.942%



Gambar 3. Persentase massa padatan pada proses pemanasan dan pendinginan CaCl_2 hidrat

Efek korosi akibat penggunaan garam hidrat sebagai refrigeran sekunder terhadap material yang berkontak langsung pada sistem pengkondisian udara jenis *chiller* perlu diperhatikan. Material yang perlu diuji korosi adalah; tembaga pada evaporator *chiller* dan FCU, besi cor, kuningan pada pompa, serta *stainless steel* dan baja karbon pada sistem perpipaan.

Hasil pengujian laju korosi untuk garam hidrat dari senyawa CaCl_2 seperti terlihat pada Tabel 4. Laju korosi dari setiap material tidak berbeda jauh dengan data yang ditampilkan Zabeka, dkk [15]. Khusus untuk material baja karbon masih perlu diteliti lebih lanjut untuk mengurangi laju

Tabel 4. Laju korosi pada material akibat garam hidrat dari CaCl_2 dengan konsentrasi 55%

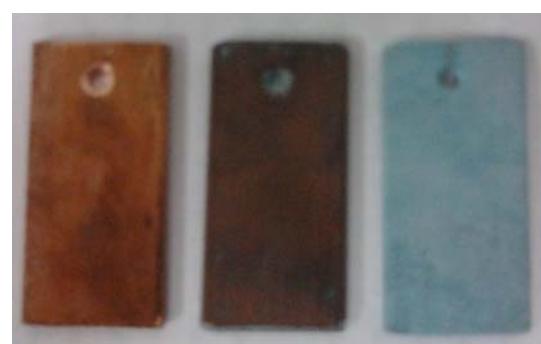
Jenis material	Laju korosi (mg/cm ² .yr)		Keterangan [15]
	Hasil pengujian	Zabeka, dkk [15]	
Tembaga	2.6266	0.4 - 5	<i>Recommended</i>
Kuningan	1.888436	0.2 - 2.5	<i>Recommended</i>
Besi cor	0.152297	-	-
Baja karbon	32.00357	26 - 37	<i>Caution recommended</i>
Stainless steel	0.683666	0 - 0.4	<i>Recommended</i>

Kesimpulan

Bahan berubah fasa dari campuran CaCl_2 dan air dengan komposisi 55% : 45% serta campuran Na_2HPO_4 dan air dengan komposisi 10% : 90% dapat diteliti lebih lanjut untuk dijadikan kandidat refrigeran sekunder pada sistem pengkondisian udara jenis *chiller* dengan penambahan anti korosi pada bahan tersebut.

korosinya. Pemberian anti korosi merupakan salah satu cara untuk mengatasi persoalan tersebut. Laju korosi untuk garam hidrat dari senyawa Na_2HPO_4 pada material tembaga masih dapat direkomendasikan yakni $2.547 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{yr}$.

Kontak material tembaga dengan CaCl_2 hidrat tidak membuat lapisan seperti terlihat pada Gambar 4. bagian a. Sedangkan kontak material tembaga dengan Na_2HPO_4 hidrat membentuk lapisan seperti terlihat pada Gambar 4. bagian c. Setelah dibersihkan, warna tembaga sedikit berubah seperti terlihat pada Gambar 4. bagian b. Lapisan yang terbentuk ini tentu akan mempengaruhi perpindahan panas pada evaporator dan FCU.



Gambar 4. Tembaga setelah diuji korosi; (a) CaCl_2 hidrat, (b) Na_2HPO_4 setelah dibersihkan, (c) Na_2HPO_4 sebelum dibersihkan

Referensi.

- [1] Tim Balai Sains Bangunan, Laporan Audit Energi Gedung Sumberdaya Air dan Penataan Ruang Kementerian Pekerjaan Umum. Bandung: Puslitbang Permukiman, 2010
- [2] JICA Study on Energy Efficiency and Conservation Improvement in Indonesia 2007 - 2008 <http://eneken.ieej.or.jp/en/data/pdf/491.pdf>, diakses 8 – 10 – 2012

- [3] Y.S. Indartono, N.T. Setioputro, N.P Tandian, A.D. Pasek, A. Suwono, Development of Energy Saving Air Conditioning System by Substituting Primary and Secondary Refrigerants, Proceeding of International Conference on Cooling and Heating Technologies, Jinhae, Korea, 28-31 October 2008.
- [4] O. Hidemasa, T. Shingo, Air-Conditioning System Using Clathrate Hydrate Slurry, JFE Technical Report, 2004, No. 3
- [5] G. Li, Y. Hwang, R. Radermacher, Review of cold storage materials for air conditioning application, International Journal of Refrigeration, xxx (2012) I-25
- [6] S.D. Sharma, K. Sagara, Latent Heat Storage Materials and System: A Review, International Journal of Green Energy, 2: 1 –56, 2005
- [7] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, Applied Energy 92 (2012) 593–605
- [8] A.A. Al-Abi, S.B. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman, C.H. Lim, Abdulrahman, Review of thermal energy storage for air conditioning systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 5802–5819
- [9] Z. Youssef, A. Delahaye , L. Huang, F. Trinquet, L. Fournaison, C. Pollerberg, C. Doetsch, State of the art on phase change material slurries, Energy Conversion and Management 65 (2013) 120–132
- [10] <http://www.cal-chlor.com/PDF/GUIDE-physical-properties.pdf>, diakses 25 April 2013
- [11] Magin, R.L., Mangum, B.W., Statler, J.A., and Thornton, D.D., 1981, Transition Temperatures of the Hydrates of Na₂SO₄, Na₂HP₄ and KF as Fixed Points in Biomedical Thermometry, Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 86, No.2, March-April 1981
- [12] NaH₂PO₄, Aqueous Salt Solutions, Aqueous Solutions Aps.
<http://www.phasediagram.dk/binary/sodiumphosphate.htm>, diakses 25 April 2013
- [13] D.S Viswanath, T.K. Ghosh, D.H.L. Prasad, N.V.K. Dutt, K.Y. Rani, Viscosity of Liquid Theory, Estimation, Experiment, and Data, Springer, Dordrecht, 2007
- [14] Centrifugal pumps Selection and Application into the System, <http://jensapardi.files.wordpress.com/2010/02/centrifugal-pump-manual-12.pdf>, diakses 10 Oktober 2013
- [15] H. Mehling, L.F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM An up to date introduction into basics and application, Springer, Berlin, 2008