

RANCANG BANGUN DAN KARAKTERISASI ICE SLURRY GENERATOR

Nandy Putra, Nasruddin, Angga Permana, I Made Arya Jatmika

Laboratorium Perpindahan Kalor

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok

nandypyutra@eng.ui.ac.id

Abstrak

Saat ini harga akan energi listrik semakin mahal sehingga perlu dilakukan upaya pengurangan biaya energi. Pada mesin pendingin penghematan dilakukan dengan menggunakan ice slurry sebagai secondary refrigerant. Ice slurry, berupa campuran antara fraksi es dan air dalam larutan, memiliki energi yang terdiri dari energi latent dan sensibel sehingga dapat menghasilkan efek pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan chilled water dengan energi pendinginan yang hanya berasal dari energi sensibel saja. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mengenai ice slurry.

Ice slurry dihasilkan dari ice slurry generator dengan menggunakan sistem refrigerasi. Bahan pembuat ice slurry adalah air ditambah aditif diethylene glycol serta cream. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem ice slurry generator dan menganalisa pengaruh penambahan aditif terhadap karakteristik ice slurry yang dihasilkan. Dengan penambahan diethylene glycol 6% - 10%, diperoleh ice slurry dengan ukuran partikel kristal yang kecil dan halus, dengan nilai coefficient of performance (COP) 3,14 – 3,51.

Keywords – ice slurry, ice slurry generator, refrigeration, coefficient of performance.

1. Pendahuluan

Salah satu cara untuk meningkatkan produktivitas kerja para karyawan, ialah dilakukan dengan cara meningkatkan kenyamanan ruang kerja dengan mengkondisikan udara pada temperatur yang nyaman bagi manusia. Hampir diseluruh gedung perkantoran dilengkapi dengan sistem tata udara, akan tetapi dengan meningkatnya kebutuhan energi dan semakin menipisnya cadangan energi, maka harga energi listrik semakin mahal apalagi pada waktu beban puncak. Pemanfaatan energi listrik pada waktu bukan beban puncak dapat lebih menghemat biaya karena harga per kWh pada waktu bukan beban puncak relatif lebih murah akan tetapi permasalahannya waktu bukan beban puncak adalah pada tengah malam sementara aktivitas perkatoran pada siang sampai sore hari.

Terdapat sistem pendinginan terpusat yang dikembangkan dengan media pendinginnya ice slurry. Keuntungan sistem dengan ice slurry adalah bahwa sistem tidak bekerja terus menerus dan ice slurry sendiri mempunyai efek pendinginan 4-6 kali lebih baik daripada *chilled water*, sehingga dapat menghemat biaya operasi sistem pendingin. Dengan penggunaan ice slurry sebagai *secondary refrigerant* maka akan mengurangi ukuran tangki penyimpanan, pompa dan juga ukuran *ducting* [1]. Selain daripada itu apabila ice slurry dapat dibuat pada waktu bukan beban puncak yang kemudian ice slurry dapat disimpan dan digunakan pada siang hari maka dapat menghemat biaya operasi.

Pada penelitian ini memiliki tujuan untuk rancang bangun ice slurry generator dan mempelajari karakteristik ice slurry yang dihasilkan.

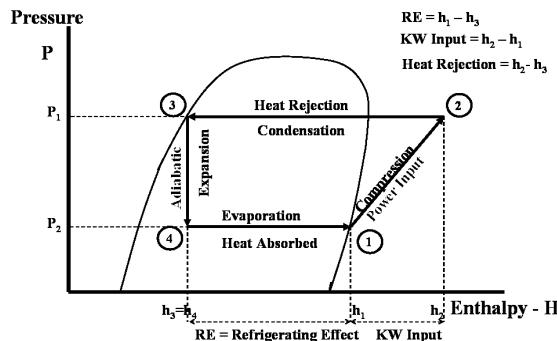
2. Ice Slurry

Ice slurry adalah suatu campuran antara larutan air dengan kristal es yang dapat dipompakan [2]. *Ice slurry* terbentuk dari kristalisasi es yang merupakan fungsi dari perubahan temperatur. Kristal es merupakan materi yang relatif tidak stabil dan pada tahap pembekuan mengalami perubahan dalam jumlah, ukuran dan bentuk yang disebut rekristalisasi. Secara umum *ice slurry* mempunyai sifat dan karakteristik fisik sebagai berikut :

1. Larutan dan padatan dengan temperatur sampai -15 °C.

2. Dapat dibuat dari larutan *brine* yang dipakai di bawah nilai titik bekunya dengan beban pendinginan pada temperatur antara -2°C sampai dengan -50°C .
3. *Ice slurry* akan menjadikan larutan mempunyai sifat dan perilaku yang sangat berbeda dengan *brine* yang melarutkannya.
4. Merupakan fluida 2 fasa non-Newtonian pada fraksi es yang tinggi.
5. Memerlukan perhitungan pemipaan, pompa, *heat exchanger*, dan *storage tank* yang berbeda.

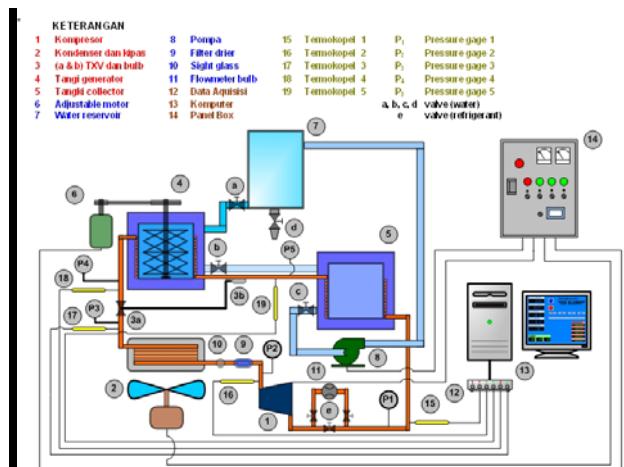
Ice slurry dihasilkan dengan menggunakan sistem refrigerasi konvensional. Pada gambar 1 dapat dilihat diagram P-h siklus refrigerasi. [3]



Gambar 1. Diagram P-h siklus pendinginan

3. Alat Pengujian Ice Slurry

Pada gambar 2 dapat dilihat skema Ice Slurry Generator. Cara kerja alat dibagi menjadi dua bagian yaitu, aliran refrigeran dalam proses pendinginan dan aliran air sebagai beban yang akan ditinggikan.



Gambar 2. Skema Ice Slurry Generator

Air sebagai bahan baku pembuat es ditampung di *water reservoir* kemudian dialirkan ke tangki generator. Refrigeran akan dinaikkan tekanannya di kompresor kemudian akan mengalir masuk ke kondenser. Pada kondenser terjadi perubahan fasa refrigeran dari uap (*vapour*) menjadi cair (*liquid*) dengan pelepasan panas ke lingkungan dengan bantuan kipas (*air cooled*). Refrigeran akan melalui suatu alat ekspansi (TXV) yang berfungsi menurunkan tekanan dan mengatur jumlah aliran refrigeran yang mengalir pada sistem. Setelah itu refrigeran akan mengalir pada koil di sekeliling tangki *generator* kemudian ke koil pada tangki *collector*. Pada saat ini terjadi perubahan fasa refrigeran dari cair (*liquid*) menjadi uap (*vapour*) karena refrigeran menyerap panas dari lingkungannya, dalam hal ini adalah panas dalam tangki. Hal ini akan dipertahankan selama waktu pendinginan (*chilling time*) sehingga air dalam tangki akan turun temperaturnya dan akhirnya berubah fasa menjadi es. Selama proses pendinginan, motor

dinyalakan sehingga auger yang porosnya terhubung dengan poros motor akan menghancurkan es yang terbentuk pada tangki generator. Setelah terbentuk di tangki generator maka *ice slurry* akan dialirkan ke tangki *collector*. Tangki *collector* berfungsi sebagai tempat penampungan *ice slurry* yang dihasilkan. Refrigeran uap dengan tekanan dan temperatur rendah kemudian mengalir ke kompresor dan siklus berulang terus selama proses pembuatan *ice slurry*. *Ice slurry* yang ditampung pada tangki *collector* lama kelamaan akan mencair sehingga tidak dapat dipakai lagi esnya untuk pendinginan. Oleh karena itu akan dialirkan lagi ke *water reservoir* dengan menggunakan pompa. Dari *water reservoir* air dapat diproses lagi menjadi es dengan mengalirkannya ke tangki *generator*. Bagian bawah *water reservoir* dilengkapi *drain valve* untuk pembuangan air keluar sistem.

Dalam instalasi alat pengujian ini dipasang 5 buah termokopel tipe K dan 5 buah *pressure gauge* untuk mengukur besarnya temperatur dan tekanan. Termokopel dan *pressure gauge* diletakkan pada *suction* kompresor, *discharge* kompresor, masuk ekspansi, keluar ekspansi, dan keluar evaporator. Termokopel dihubungkan ke data akusisi dan komputer untuk kontrol pengukuran dan penyimpanan datanya secara digital, sedangkan untuk *pressure gauge*, pembacaan dilakukan secara manual.

Dalam penelitian ini bahan baku yang digunakan untuk membuat *ice slurry* adalah air murni, dengan tambahan aditif *diethylene glycol (DEG)* konsentrasi 6%, 8%, dan 10%, serta *cream* dengan volume total 8 liter. Bahan campuran *cream*, yang terdiri dari :

- Krim (*powder milk*), *milk solid non fat* 21%.
- *Stabilizer (carboxymethyl cellulose)* 0,2%.
- *Emulsifier (polysorbate-80)* 0,2%.
- Air 79% (6,5 liter)

4. Hasil dan Analisa data

Berdasarkan pengambilan data maka didapatkan nilai temperatur dan tekanan operasi dari *ice slurry generator*. Setelah itu data akan diplot ke dalam diagram P-h dari R-22 sehingga diketahui besarnya parameter lainnya untuk setiap titik, kemudian dapat dihitung besarnya efek pendinginan, kerja kompresor dan COP dari *ice slurry generator*. Data yang diperoleh dan hasil dari perhitungan dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Sedangkan untuk siklus refrigerasi dari *ice slurry generator* dapat dilihat pada gambar 3.

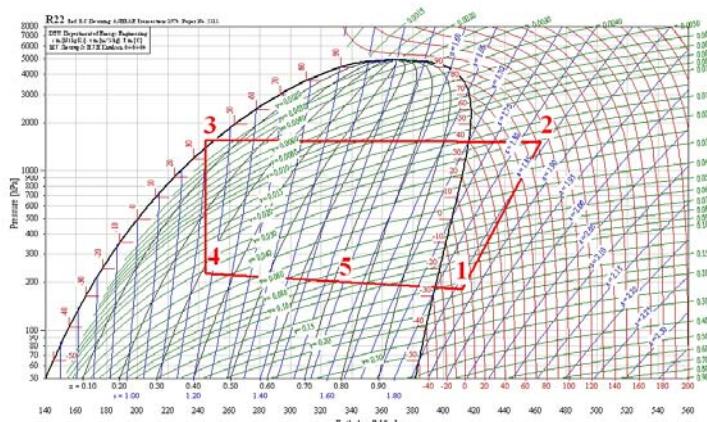
Tabel 1. Data temperatur, tekanan dan arus listrik rata-rata pengujian ice slurry generator

Volume		8 liter	8 liter	8 liter	8 liter	7 liter
Aditif		0	DEG 6%	DEG 8%	DEG 10%	Cream
Masuk Kompresor (1)	P (kPa)	182.092	155.142	153.644	171.074	189.808
	T (°C)	0.439	-1.896	-3.621	-0.940	1.182
Keluar Kompresor (2)	P (kPa)	1514.751	1495.599	1500.556	1476.268	1504.696
	T (°C)	93.089	88.228	90.404	95.248	94.014
Masuk Ekspansi (3)	P (kPa)	1550.866	1502.685	1539.085	1514.751	1549.225
	T (°C)	36.075	33.980	33.567	33.958	37.010
Keluar Ekspansi (4)	P (kPa)	227.729	198.235	188.726	218.215	242.093
	T (°C)	-24.406	-29.988	-26.539	-22.939	-20.283
Keluar Evaporator (5)	P (kPa)	203.105	177.933	166.696	192.611	218.399
	T (°C)	-29.130	-32.103	-29.538	-26.048	-22.921

Penurunan temperatur evaporasi akan menurunkan efek refrigerasi dan menurunkan nilai COP. Kenaikan temperatur kondensasi juga akan menurunkan nilai COP. Sebagai contoh, pada Tabel 2, data 10% DEG mendapatkan nilai COP 3,23 dengan temperatur evaporasi (T_4) - 22,94 °C, lebih tinggi daripada data *cream* dengan COP 3,14 dengan temperatur evaporasi (T_4) - 20,28 °C. Pada kondisi operasi yang hampir sama, teori ini belum dapat dibuktikan karena nilai COP yang diperoleh cenderung hampir sama, berkisar antara 3,14 – 3,51. Dari perhitungan diperoleh laju aliran massa refrigeran berkisar antara 0,00886 – 0,01037 kg/s.

Tabel 2. Pengolahan data variasi bahan baku ice slurry

Volume Campuran	8 liter	8 liter	8 liter	8 liter	7 liter
Aditif	0	DEG 6%	DEG 8%	DEG 10%	Cream
Arus (l)	2.410	2.114	2.059	2.302	2.433
m dot (kg/s)	0.01037	0.00964	0.00886	0.00938	0.01036
W _C (W)	530.095	465.056	452.941	506.512	535.333
Q _C (W)	-2268.456	-2097.193	-1949.254	-2098.168	-2263.107
Q _{TG} (W)	1568.787	1466.408	896.939	811.760	710.185
Q _{TC} (W)	169.574	165.729	599.374	779.897	1017.588
Q _E (W)	1738.361	1632.137	1496.313	1591.657	1727.774
COP	3.279	3.510	3.304	3.142	3.227



Gambar 3. Diagram P-h siklus refrigerasi ice slurry generator [5]

Analisa Sistem Refrigerasi

Analisa sistem refrigerasi dapat dilakukan dengan menggunakan gambar 2 dan tabel 1. Data di atas diambil dari hasil pengolahan data air murni. Pada kondisi siklus aktual kompresi tidak terjadi secara isentropis karena pengaruh efektivitas kompresor.

Proses 2-3 yang terjadi pada kondenser. Tekanan sistem naik dari 1514 kPa menjadi 1551 kPa, sedangkan temperatur menurun drastis dari 93 °C menjadi 36 °C. Hal ini menunjukkan adanya panas yang dibuang dari sistem ke lingkungan. Pada proses kondensasi terjadi proses *subcooled* sekitar 4 °C dan besarnya tidak dapat diubah, karena debit aliran dan kecepatan udara pendingin kondenser tidak dapat diatur.

Pada proses 3-4 terjadi penurunan tekanan kondensasi menjadi tekanan evaporasi. Proses ini tidak terjadi perubahan energi. Proses evaporasi melewati tiga titik, yaitu titik 4, titik 5 dan titik 1. Proses 4-5 adalah proses yang terjadi pada tangki *generator* dan proses 5-1 adalah proses yang terjadi pada tangki *collector*. Proses evaporasi terjadi kehilangan tekanan karena konstruksi pipa yang mempunyai banyak belokan dan sambungan. Pada proses ini refrigeran mengalami perubahan fasa, dari *liquid* dan *vapour* menjadi sepenuhnya *vapour* dan terjadi pemanasan lanjut (*superheat*) refrigeran sebelum memasuki kompresor. Hal ini terjadi akibat penggunaan alat ekspansi *thermostatic expansion valve* (TXV) yang bisa mempertahankan derajat *superheat*.

Analisa Perancangan Sistem

Komponen penting yang digunakan untuk mendapatkan bentuk partikel es dalam pembuatan *ice slurry* adalah motor dan auger. Auger, berupa lilitan besi *stainless steel* yang porosnya terhubung melalui *belt* dan *pulley* dengan poros motor sebagai penggeraknya. Diamater auger lebih kecil daripada diameter dalam tangki *collector* untuk menghindari gesekan antara auger dengan dinding dalam tangki. Es awalnya terbentuk pada dinding tangki sehingga tidak dapat dihancurkan oleh auger. Penumpukan es pada dinding akan menghambat

perpindahan panas dari air ke refrigeran karena beban akibat konduksi (es) lebih besar daripada beban konveksi air. Dengan kondisi ini, jika bahan baku yang digunakan dalam pembuatan *ice slurry* ini adalah bahan yang keras dalam fasa padat (es) seperti air murni, maka sistem akan sulit menghasilkan *ice slurry*. Penggunaan bahan baku sebanyak 8 liter menghasilkan *ice slurry* sekitar 6 liter, dimana selisihnya adalah es yang menempel pada dinding tangki yang tidak dapat dihancurkan. Penggunaan bahan baku dengan volume 10 liter menyebabkan sebagian volume bahan baku tumpah keluar melalui celah tutup tangki *generator* akibat putaran auger yang cukup tinggi. Penggunaan volume bahan baku 5 liter tidak mendapatkan kuantitas hasil yang maksimal karena sebagian besar dari volume tersebut adalah es yang menempel pada dinding tangki. Volume tangki *generator* dan tangki *collector* masing-masing adalah 13,8 liter.

Pengujian lain yang dilakukan terhadap kemampuan insulasi oleh tangki *collector*. Dengan menyimpan *ice slurry* ke tangki dalam keadaan tertutup dan sistem refrigerasi dimatikan, setelah 3 jam temperatur tangki dari *ice slurry* masih cukup rendah. Ini menunjukkan insulasi *polyerthane* setebal 60 mm melingkar pada tangki *generator* dan *collector* dapat bekerja dengan baik.

Pengaruh Aditif Terhadap Pembentukan *Ice Slurry*

Penambahan aditif pada bahan pembuat *ice slurry* akan berpengaruh terhadap ukuran kristal *ice slurry* dan kemampuan dari auger untuk menghasilkan kristal es.

1. Air murni

Dengan menggunakan air murni sebagai bahan baku, kristal es yang menempel pada dinding tangki *generator* sangat keras sehingga auger tidak dapat menghancurkan es tersebut karena auger tidak cukup tajam untuk menghancurkan kristal es sehingga *ice slurry* tidak dapat terbentuk. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. *Ice slurry* yang tidak dapat terbentuk dengan aditif 0%



Gambar 5. *Ice slurry* yang terbentuk dengan aditif (a) DEG 6%, (b) DEG 8%, (c) DEG 10%

2. Penambahan aditif DEG 6%, 8 % dan 10 %

Dengan penambahan aditif DEG sebesar 6 % dalam larutan, es pada dinding tangki *generator* cukup lunak sehingga auger dapat berfungsi dengan baik membentuk *ice slurry* seperti terlihat pada gambar 5 a. Untuk menghancurkan es, putaran motor yang diberikan sebesar 500 rpm. Sementara pada penambahan aditif DEG sebesar 8% es pada dinding tangki *generator* dapat dihancurkan oleh auger. Dengan putaran motor 250 rpm cukup untuk menghasilkan butiran

kristal *ice slurry* yang halus. Hal ini dapat dilihat pada gambar 5b. kemudian Penambahan aditif DEG sebesar 10 % dapat menghasilkan es yang cukup lunak sehingga auger dapat membentuk *ice slurry* dengan butiran yang sangat halus. Hal ini dapat dilihat pada gambar 5c.

3. Cream

Dengan menambahkan aditif ini es yang dihasilkan pada dinding tangki generator sangat keras sehingga Auger tidak dapat menghancurkan es tersebut dan *ice slurry* tidak dapat terbentuk. Hal ini dapat dilihat pada gambar 6.

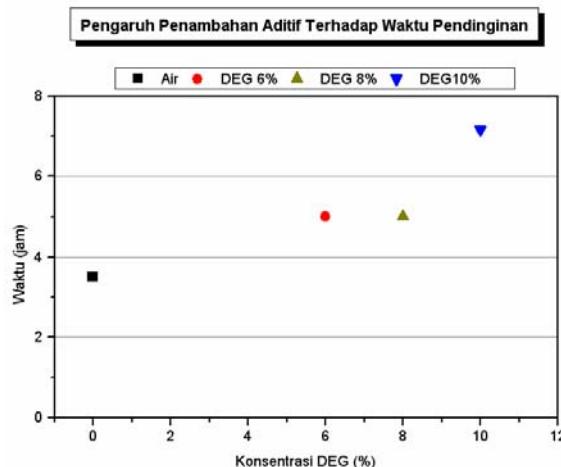


Gambar 6. *Ice slurry* yang gagal terbentuk dengan aditif cream

Berdasarkan pengamatan, ukuran kristal *ice slurry* terkecil diperoleh dengan penambahan DEG 10 % dan ukuran kristal *ice slurry* terbesar diperoleh dengan penambahan DEG 6%.

Pengaruh Aditif Terhadap Waktu Pendinginan

Variasi aditif yang digunakan berpengaruh terhadap waktu pendinginan. Waktu pendinginan disini didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan oleh *ice slurry generator* untuk menghasilkan *ice slurry*. Gambar 7 menunjukkan perbedaan waktu pendinginan dengan variasi aditif dan konsentrasinya.



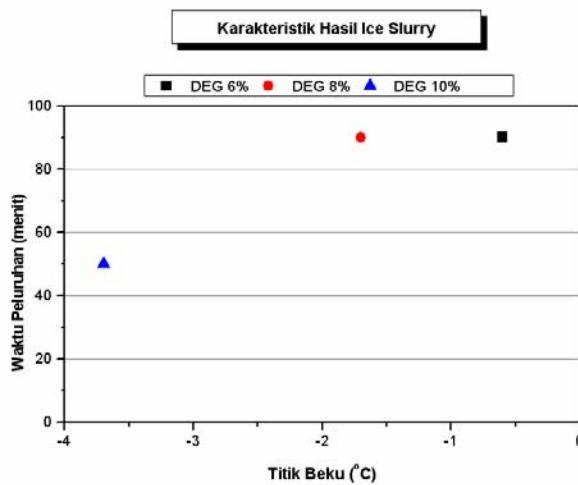
Gambar 7 Pengaruh aditif terhadap waktu pendinginan

Berdasarkan gambar 7 dapat dilihat bahwa waktu pendinginan dengan menggunakan aditif lebih lama dibandingkan waktu pendinginan air tanpa menggunakan aditif. Hal ini disebabkan karena dengan adanya aditif titik beku dari larutan akan turun sampai dengan nilai dibawah 0°C. Penurunan titik beku disebabkan karena dengan penambahan aditif maka tekanan uap larutan akan lebih rendah dari pada tekanan uap air murni, sehingga akan menurunkan titik triple dari larutan. Konsentrasi DEG 10% mempunyai waktu pendinginan yang lebih lama dibandingkan dengan aditif yang lain karena DEG 10% menurunkan titik beku bahan pembuat *ice slurry* lebih besar dari aditif lain.

Pengaruh Aditif Terhadap Waktu Peluruhan Kristal Es

Ice slurry yang dihasilkan diamati waktu peluruhananya, yaitu waktu yang diperlukan *ice slurry* untuk mencair. Pengamatan dilakukan dengan mengambil sampel *ice slurry* sebanyak 500 mL. Waktu peluruhan tergantung dari banyaknya aditif yang ditambahkan pada bahan pembuat *ice slurry*. Semakin banyak aditif yang ditambahkan maka waktu peluruhan akan semakin cepat. Dari gambar 8 dapat dilihat waktu peluruhan *ice slurry*.

Berdasarkan gambar 8 waktu peluruhan dengan penambahan DEG 10% adalah yang paling kecil dibandingkan dengan peluruhan dengan menggunakan DEG 6% dan DEG 8%. Hal ini terjadi karena ukuran kristal *ice slurry* yang dihasilkan oleh DEG 10% lebih kecil dibandingkan dengan ukuran kristal *ice slurry* dengan penambahan aditif DEG 6% dan DEG 8%. Dengan ukuran kristal *ice slurry* yang semakin kecil maka akan memperluas permukaan *ice slurry* sehingga perpindahan kalor yang terjadi pada *ice slurry* semakin tinggi.



Gambar 8 Pengaruh aditif terhadap penurunan titik beku

5. Kesimpulan

1. *Ice slurry* generator dapat menghasilkan *ice slurry* dengan baik pada volume total bahan baku 6 liter sampai 9 liter.
2. *Coeffisient of performance (COP)* *ice slurry generator* berkisar antara 3,14 – 3,51, derajat *superheat* TXV yang diperoleh adalah 23,85 °C – 27 °C, sedangkan derajat *subcooled* yang diperoleh sekitar 3 °C – 5 °C.
3. Jenis dan jumlah aditif yang ditambahkan pada bahan pembuat *ice slurry* berpengaruh terhadap waktu pendinginan, pembentukan *ice slurry*, ukuran kristal dan waktu peluruhan *ice slurry*.

6. Daftar Pustaka

- [1] Wang, MJ., et al. "Ice slurry Based Thermal Storage Technology", dalam 7th Expert Meeting and Work Shop, Beijing, Oktober 2004.
- [2] Bellstedt, Michael, et al., "An Annual Power Cost Comparison Of Conventional And Ice slurry Systems Indicates Impressive Potential Savings For Abattoir Refrigeration", Sydney, 2004.
- [3] Whitman, Johnson, Tomcryzk, "Refrigeration & Air Conditioning Technology 4th Edition", Delmar, USA, 2000.
- [4] Kuehn, Thomas H., Ramsey, James W., Threlkeld, James L., "Thermal Environmental Engineering 3rd Edition", Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [5] "CoolPack, A Collection of Simulation Tools For Refrigeration", Departement Of Energy Engineering Technical University Of Denmark, 2001.
- [6] Hindarto, Erwin, "Rancang Bangun Pembangkit Ice slurry (Ice slurry Generator)", Depok, 2004.