

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 DEFINISI**

*Ice slurry* merupakan larutan cair dengan partikel-partikel es yang memiliki ukuran diameter rata-rata partikel es sama dengan atau kurang dari 1 mm yang masih dapat dialirkan menggunakan pompa. Sehingga dapat dikatakan *ice slurry* merupakan partikel es yang terdistribusi merata pada air atau larutan, dimana ditambahkan satu atau beberapa jenis zat dengan tujuan :

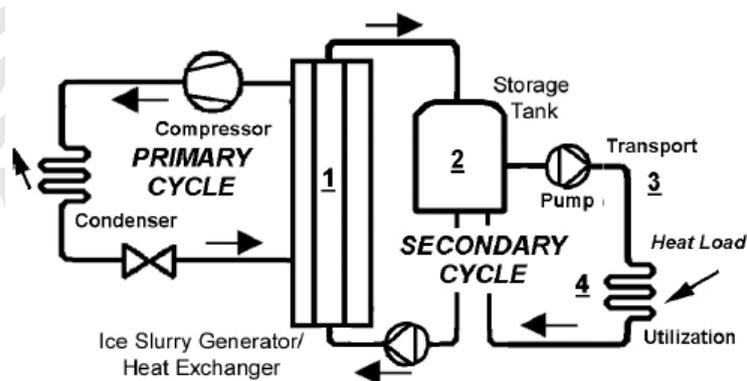
- Penurunan titik beku untuk aplikasi dibawah nol derajat celcius
- Mengurangi viskositas
- Meningkatkan konduktivitas termal dari fase cairnya
- Mengurangi tingkat korosivitas *ice slurry*
- Pencegahan aglomerasi

#### **2.2 SEJARAH**

Teknik pengawetan bahan makanan menggunakan salju atau es telah diterapkan sejak beberapa millenium yang lampau, terutama oleh bangsa Romawi yang sadar akan metode pendinginan alami ini. Untuk tujuan ini es dari danau atau sungai yang membeku diambil dan dipindahkan ke pemukiman penduduk untuk aplikasi domestik terutama untuk pendinginan bahan makanan. Kadang untuk mencapai temperatur yang lebih dingin, garam ditambahkan ke dalam air yang akan dijadikan es.

Teknologi *ice slurry* ditemukan di Rusia, 80 tahun yang lalu namun pengembangannya di set ketika perusahaan di Kanada dan Jerman memulai untuk memproduksi mesin pembuat *ice slurry* (*ice slurry generator*) untuk tujuan komersial. Semakin halus partikel es nya semakin mudah sifat transport-nya.

Penipisan lapisan ozon dan pemanasan global membuat industri refrigerasi mempertimbangkan penggunaan *refrigerant* alami sebagai *refrigerant* yang menarik lagi seperti hidrocarbon, propane, butane, amonia, dll oleh karena bukan merupakan BPO. *Refrigerant* alami telah digunakan semenjak awal teknologi refrigerasi yaitu pertengahan abad 19, namun sekitar tahun 1930 digantikan oleh *refrigerant* sintetis seperti CFCs dan HCFCs. Kelebihan *refrigerant* sintetis ini ialah tidak beracun dan tidak terbakar namun memiliki efek yang negatif terhadap alam, di lain pihak sebagian besar *refrigerant* alami ialah beracun dan dapat terbakar sehingga memerlukan penanganan sistem yang ketat atau sebagai alternatif menggunakan sistem refrigerasi dengan sirkuit kedua yang melibatkan *refrigerant* kedua (*secondary refrigerant*) sebagai medium penghantar kalor dari tempat yang akan dikontrol suhunya ke sistem refrigerasi utama, dengan demikian *refrigerant* utama terpusat pada suatu ruangan sehingga dapat lebih mudah diawasi dan dipelihara. *Ice slurry* sebagai *refrigerant* kedua memiliki beberapa keunggulan dibandingkan larutan biner konvensional yang disebabkan tingginya kapasitas panas yang dimiliki dan kemampuannya untuk diaplikasikan pada suhu sangat rendah.



Gambar 2.1. Skematik diagram dari sistem *ice slurry* sebagai *secondary refrigerant* (Meewissee, 2004, hal. 2)

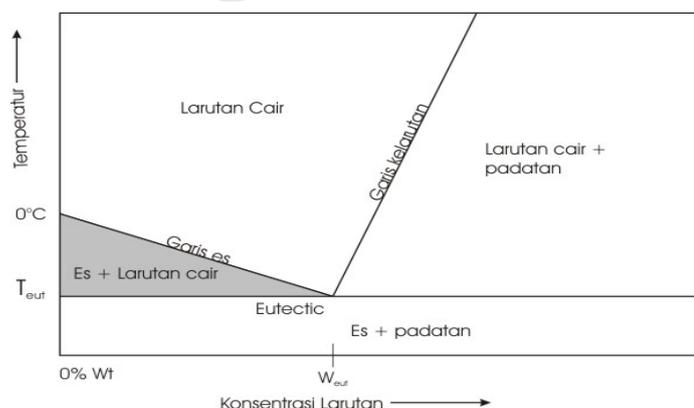
Pada permulaan 1990 beberapa grup peneliti di Industri dan Universitas mulai untuk menyelidiki kelakukan dari *ice slurry*. Di tahun 1993, Snoek melakukan penelitian tersistematis pertama mengenai sistem pendinginan distrik menggunakan *ice slurry*. *Danish Technological Institute* di Denmark merupakan lembaga pertama yang aktif meneliti sifat-sifat dasar *ice slurry*, beberapa tahun

kemudian lembaga ini berkolaborasi dengan beberapa industri untuk mendirikan *Ice slurry Center*. Di tempat yang lain, sebuah grup dari Swiss meluncurkan proyek berskala besar yang disebut FIFE (*Fine-crystalline Ice : Fundamentals and Engineering*) dan memulai untuk menyelidiki banyak hal dasar dan penerapan dari *ice slurry*. Grup ini pulalah yang memulai koordinasi tingkat internasional untuk segala aktifitas mengenai *ice slurry* dengan mengajukan lembaga kerja untuk *ice slurry* yang dinamai *International Institute of Refrigeration (IIR)*. Sampai dengan saat ini IIR telah menyelidiki berbagai hal mengenai *ice slurry* diantaranya sifat fisik, karakteristik dinamis (pola aliran, diagram phase, pressure drop, dll) dan karakteristik termodinamika (konduktivitas panas, perpindahan panas antara *ice slurry* dengan dinding untuk aliran laminar dan turbulen, dll).

### 2.3 ZAT PENURUNAN TITIK BEKU

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, perbedaan *ice slurry* dengan *secondary refrigerant* lainnya ialah terletak pada perubahan fase yang dimanfaatkan pada *ice slurry* untuk mendapatkan efek kapasitas panas yang besar namun tetap dapat dipompa. Agar *ice slurry* tetap dapat dipompa pada temperatur yang rendah (dibawah titik beku air) diperlukan sejumlah besar *ice slurry* yang tetap berada pada fase cair, untuk tujuan ini maka diperlukan penambahan zat penurun titik beku pada air.

Apabila sejumlah air ditambahkan kedalamnya suatu zat yang mampu larut dengan air pada konsentrasi tertentu, maka akan didapatkan beberapa bentuk fase yang tergantung terhadap suhu dan konsentrasi larutan seperti yang diperlihatkan pada diagram fase untuk larutan binary dibawah :

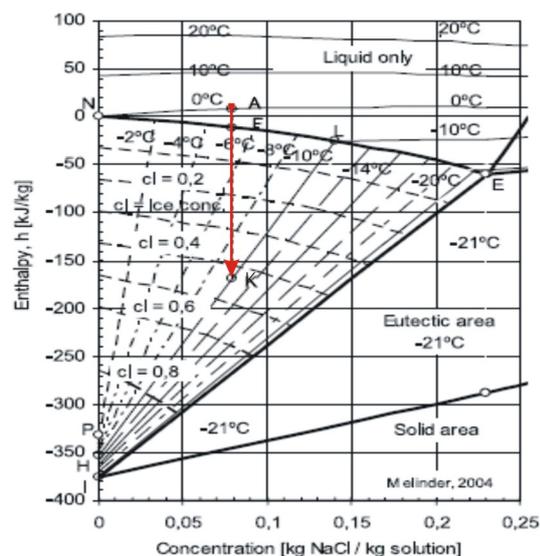


Gambar 2.2. Fase Diagram dari larutan binary

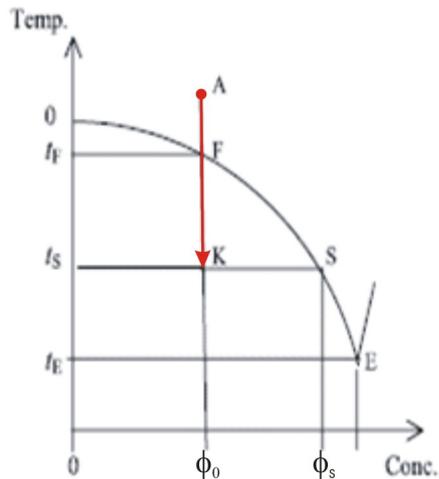
Pada diagram fase diatas, daerah kerja *ice slurry* adalah daerah yang berada pada fase es + larutan cair. Garis es mempresentasikan hubungan antara konsentrasi larutan dengan temperatur dimana larutan dan partikel es dalam keseimbangan. Garis kelarutan mempresentasikan keseimbangan antara larutan dengan fase padatnya, pada beberapa larutan elektrolit terdapat bentuk dimana larutannya memiliki lebih dari satu garis kelarutan. Titik dimana garis es dan garis kelarutan berpotongan disebut titik *eutectic*, pada titik ini terdapat fase padatan, larutan cair dan es secara bersamaan dan berada pada keseimbangan. Dari diagram fase diatas dapat diketahui pula bahwa temperatur *eutectic* merupakan temperatur minimum yang dapat dicapai pada suatu jenis *ice slurry*, besarnya temperatur *eutectic* ini tergantung dari jenis larutan yang digunakan.

### 2.3.1 Titik Beku Dan Konsentrasi Es

Gambar 2.4 menunjukkan titik beku suatu larutan berubah terhadap komposisi campuran. Peningkatan konsentrasi dari zat penurun titik beku akan menyebabkan penurunan titik beku, hal ini akan terus berlangsung sampai konsentrasi dimana garam dan air mencapai titik *eutectic* E ( $\phi_E, T_E$ ). Apabila suatu larutan dengan konsentrasi  $\phi_0$  (lihat gambar 2.4)



Gambar 2.3. Diagram Enthalpy vs Konsentrasi untuk larutan NaCl (Melinder, 2005, hal. 16)

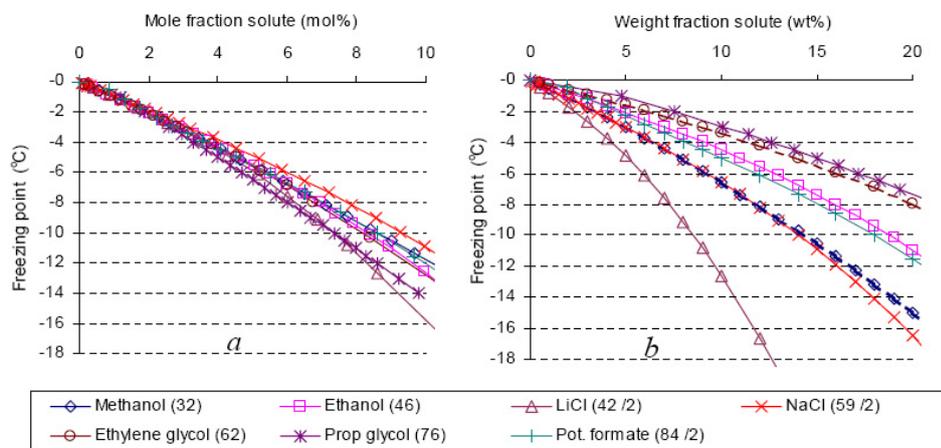


Gambar 2.4. Diagram Temperatur vs konsentrasi untuk larutan *biner* (Melinder, 2005, hal. 1)

didinginkan sampai titik dibawah titik beku F ( $\phi_0$ ,  $T_{F,0}$ ) dan mencapai keseimbangan maka kristal es yang idealnya murni air mulai terbentuk dan memisahkan diri dengan larutan sehingga konsentrasi larutan meningkat. Pada prakteknya kristal es tidak akan terbentuk sampai satu atau dua derajat dibawah titik beku, ketika beberapa kristal es sudah terbentuk maka proses selanjutnya akan lebih mudah berada pada keseimbangan.

Jika temperaturnya diturunkan lagi sampai titik K ( $\phi_0$ ,  $T_s$ ) maka akan terdapat konsentrasi es yang lebih besar dari sebelumnya dan larutan dengan kondisi ( $\phi_s$ ,  $T_s$ ) sebagaimana yang terlihat pada gambar 2.3.

Estimasi Titik beku dari beberapa larutan dapat dilihat pada grafik dibawah :



Gambar 2.5. Titik beku vs konsentrasi untuk berbagai jenis *ice slurry* (Meewis, 2004, hal. 12)

Dengan mengacu pada gambar 2.4, fraksi massa es pada suatu titik K ialah :

$$\phi_{es} = \frac{m_{es}}{m_{es} + m_s} \quad (2.1)$$

Mengingat massa zat penurun titik beku tidak berubah, yaitu

$$m_s \phi_s = \phi_0 (m_{es} + m_s)$$

atau dapat ditulis ulang menjadi

$$m_s = \frac{m_{es} \phi_0}{\phi_s - \phi_0} \quad (2.2)$$

Substitusi persamaan 2.2 ke persamaan 2.1, didapatkan:

$$\phi_{es} = \frac{\phi_s - \phi_0}{\phi_s} \quad (2.3)$$

Untuk larutan ethylene glycol,  $\phi_s$  dapat diprediksi dengan persamaan :

$$\begin{aligned} \phi_s \cdot 100 = & -3.409 \cdot 10^{-2} T - 0.1429 \cdot 10^{-2} T^2 - 4.401 \times 10^{-5} T^3 \\ & - 7.259 \times 10^{-7} T^4 - 4.809 \times 10^{-9} T^5 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dimana :

$m_{es}$  = massa es pada titik K (kg)

$m_s$  = massa larutan pada titik K (kg)

$\phi_0$  = fraksi massa awal larutan

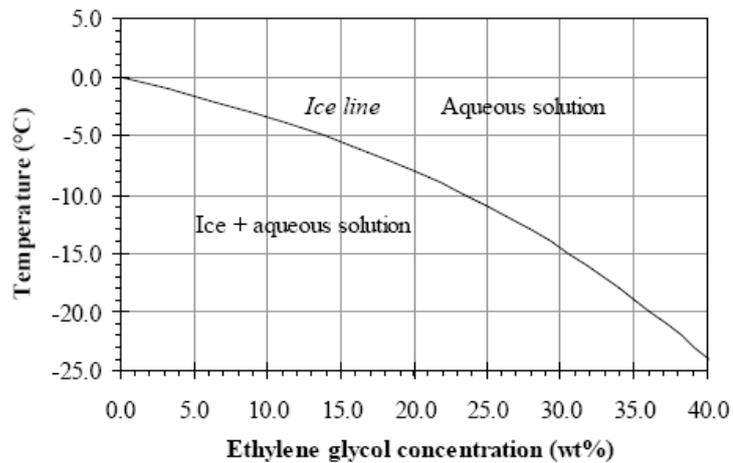
$\phi_s$  = fraksi massa larutan pada titik K

$\phi_{es}$  = fraksi massa es pada titik K

$T$  = temperatur pada titik K / temperatur akhir *ice slurry* (°C)

## 2.4 SIFAT *THERMOFLUIDA* LARUTAN BINARY AIR + ETHYLENE GLYCOL

Berbagai sifat fisik seperti massa jenis, kalor jenis, konduktifitas, viskositas, dsb dari larutan binary merupakan fungsi dari fraksi massa atau fraksi volume dari zat terlarut dan temperatur. Melinder (1997) telah meneliti akan hal ini dan berhasil membuat fungsi polynomial dari pengaruh perubahan fraksi massa dan temperatur terhadap sifat-sifat fisik larutan binary.



Gambar 2.6. Grafik temperatur vs konsentrasi untuk larutan Ethylene Glycol (Pronk, 2006, hal. 213)

#### 2.4.1 Massa Jenis, Kalor Jenis, Dan Konduktivitas *Thermal*

Massa jenis, kalor jenis, dan konduktivitas *thermal* merupakan fungsi dari temperatur dan fraksi massa zat penurun titik beku. Persamaan 2.5 dibawah merupakan persamaan umum untuk mengkalkulasi ketiga sifat themodinamika dari larutan *biner* untuk jangkauan temperatur,  $T$  dari  $T_{eq}$  sampai  $40^{\circ}\text{C}$  dan jangkauan fraksi massa,  $\phi_0$  dari 0% sampai 40%. (Melinder, 1997)

$$f = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^3 \left( C_{ij} (\phi_0 \cdot 100 - \phi_m)^i \cdot (T - T_m)^j \right) \quad (2.5)$$

Fungsi  $f$  pada persamaan diatas mewakili massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ ), kalor jenis ( $\text{J/kgK}$ ), dan konduktivitas *thermal* ( $\text{W/mK}$ ). Dengan koefisien  $\phi_m$ ,  $T_m$  dan  $C_{ij}$  untuk larutan *biner* air + ethylene glycol, dapat dilihat pada tabel I.1.

#### 2.4.2 Viskositas

Dengan menggunakan analogi yang sama pada persamaan 2.5, formula untuk viskositas larutan *biner* dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\ln(\mu_{sol} \cdot 10^3) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^3 \left( C_{ij} \cdot (\phi_0 \cdot 100 - \phi_m)^i \cdot (T - T_m)^j \right) \quad (2.6)$$

Dengan koefisien  $\phi_m$ ,  $T_m$  dan  $C_{ij}$  untuk larutan *biner* air + ethylene glycol, dapat dilihat pada tabel I.1.

### 2.4.3 Enthalpi

Dengan menggunakan analogi yang sama pada persamaan diatas, model untuk enthalpi larutan *biner* ethylene glycol + air, sbb:

$$h_{sol} = \sum_{i=0}^5 \sum_{k=0}^4 \left( C_{ij} (\phi_0 \cdot 100 - \phi_m)^i \cdot (T - T_m)^k \right) \quad (2.7)$$

koefisien  $\phi_m$ ,  $T_m$  dan  $C_{ij}$  untuk larutan *biner* air + ethylene glycol, dapat dilihat pada tabel I.1.

Tabel II.1. Nilai-nilai konstanta untuk menghitung berbagai sifat fisik larutan *biner* ethylene glycol

Property	Density	Specific heat	Thermal conductivity	Dynamic viscosity	Enthalpy
Symbol	$\rho$	$c_p$	$\lambda$	$\mu$	$h$
Unit	kg/m <sup>3</sup>	J/kg K	W/m K	Pa s	J/kg
$\phi$	0...56 wt%				
$T$	$T_{eq}...40^\circ\text{C}$	$T_{eq}...40^\circ\text{C}$	$T_{eq}...40^\circ\text{C}$	$T_{eq}...40^\circ\text{C}$	$T_{eq}...40^\circ\text{C}$
$\phi_m$	38.1615	38.1615	38.1615	38.1615	38.1615
$T_m$	6.3333	6.3333	6.3333	6.3333	6.3333
$C_{00}$	1.056E+03	3.501E+03	0.4211	1.453	-2.971E+03
$C_{01}$	-0.3987	3.954	7.995E-04	-3.747E-02	3.501E+03
$C_{02}$	-3.068E-03	6.065E-05	-5.509E-08	2.842E-04	1.977
$C_{03}$	1.233E-05	-5.979E-06	-1.460E-08	-8.025E-07	2.022E-05
$C_{04}$	-	-	-	-	-1.495E-06
$C_{10}$	1.505	-24.19	-3.694E-03	2.920E-02	-2.300E+02
$C_{11}$	-8.953E-03	0.1031	-1.751E-05	-1.131E-04	-24.19
$C_{12}$	6.378E-05	4.312E-05	6.656E-08	1.729E-06	5.155E-02
$C_{13}$	-1.152E-07	5.168E-06	2.017E-09	-5.073E-08	1.437E-05
$C_{14}$	-	-	-	-	1.292E-06
$C_{20}$	-1.634E-03	4.613E-03	2.095E-05	1.264E-04	10.52
$C_{21}$	1.541E-04	-6.595E-05	2.078E-07	6.785E-09	4.613E-03
$C_{22}$	-1.874E-06	1.620E-05	-2.394E-09	-1.685E-08	-3.298E-05
$C_{23}$	-9.809E-09	-3.250E-07	-6.772E-11	-1.082E-09	5.400E-06
$C_{24}$	-	-	-	-	-8.125E-08
$C_{30}$	-2.317E-04	6.028E-03	3.663E-07	4.386E-06	-0.1374
$C_{31}$	2.549E-06	5.642E-05	-5.272E-09	-2.191E-07	6.028E-03
$C_{32}$	-5.523E-08	-7.777E-07	-1.126E-10	-9.117E-11	2.821E-05
$C_{33}$	-	-	-	-	-2.592E-07
$C_{40}$	-8.510E-06	-7.977E-05	-6.389E-09	-9.223E-08	1.399E-03
$C_{41}$	-3.848E-08	5.190E-07	-1.112E-10	-4.294E-09	-7.977E-05
$C_{42}$	-	-	-	-	2.595E-07
$C_{50}$	-1.128E-07	-3.380E-06	-1.820E-10	-3.655E-09	6.309E-05
$C_{51}$	-	-	-	-	-3.380E-06

Sumber : Pronk. "Fluidized Bed Heat Exchangers to Prevent Fouling in Ice slurry Systems and Industrial Crystallizers." Thesis, Technische Universiteit Delft, 2006, hal. 214

## 2.5 SIFAT THERMOFLUIDA ICE SLURRY

Berbagai macam sifat fisik dari *ice slurry* seperti kapasitas panas, konduktivitas, densitas, viskositas, dan enthalpi sangat dipengaruhi oleh jumlah atau konsentrasi zat penurun titik beku, jenis zat penurun titik beku yang digunakan dan fraksi es yang terbentuk. Sifat-sifat fisik tersebut berpengaruh terhadap proses perpindahan panas dan massa dari *ice slurry* sebagai *secondary refrigerant*. Idealnya diinginkan agar *ice slurry* memiliki densitas yang tinggi, kapasitas panas yang besar, dan viskositas yang rendah agar dengan volume yang kecil, *ice slurry* mampu menyimpan panas yang besar dengan energi pemompaan yang kecil. Namun pada kenyataannya sifat-sifat tersebut seperti saling bertentangan, untuk mendapatkan densitas yang tinggi perlu dicapai suhu yang rendah yang juga berarti fraksi es yang terbentuk tinggi, fraksi es yang tinggi pada umumnya akan menyebabkan viskositas dari *ice slurry* tinggi.

### 2.5.1 Densitas

Densitas dari *ice slurry* diperoleh dengan menambahkan fraksi massa densitas es murni dan densitas larutan, atau secara matematis:

$$\rho_{is} = \frac{1}{\frac{\phi_{es}}{\rho_{es}} + \frac{(1-\phi_{es})}{\rho_s}} \quad (2.8)$$

Dimana :

$\rho_{is}$  = densitas *ice slurry*

$\rho_l$  = densitas es

$\rho_s$  = densitas larutan

Sedangkan untuk densitas es murni dibawah temperatur 0 °C dapat diestimasi dengan persamaan :

$$\rho_{es} = \rho_0 + aT \quad (2.9)$$

Dimana :

$\rho_0$  = densitas es pada temperatur 0°C, 917 kg/m<sup>3</sup>

$a = 1.73 \times 10^{-4}$

$T_{sol}$  = temperatur *ice slurry* (°C)

### 2.5.2 Kalor Jenis

Formula untuk enthalpi dari *ice slurry* merupakan gabungan dari enthalpi es dan enthalpi larutan, yaitu :

$$h_{is} = \phi_{es} \cdot -h_{es} + (1 - \phi_{es}) \cdot h_{sol}$$

$$h_{is} = \phi_{es} \left( -h_{es} \{0^\circ\text{C}\} + \int_{0^\circ\text{C}}^T -c_{p,es} dT \right) + (1 - \phi_{es}) \left( h_{liq} \{0^\circ\text{C}\} + \int_{0^\circ\text{C}}^T c_{p,sol} dT \right)$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} c_{p,is} &= \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \\ &= \frac{\partial \phi_{es}}{\partial T} \left( -h_{es} \{0^\circ\text{C}\} + \int_{0^\circ\text{C}}^T (-c_{p,es} - c_{p,sol}) dT - h_{sol} \{0^\circ\text{C}\} \right) \\ &\quad + \phi_{es} \cdot c_{p,es} + (1 - \phi_{es}) c_{p,sol} \end{aligned} \tag{2.10}$$

Dengan

$$h_{es} \{0^\circ\text{C}\} = 333430 \text{ J/kg}$$

Dimana kalor jenis es (J/kgK) untuk temperatur  $-100^\circ\text{C}$  sampai  $0.01^\circ\text{C}$ , adalah:

$$c_{p,es} = 2106.9 + 7.5982 \cdot T + 3.2628 \cdot 10^{-3} \cdot T^2$$

### 2.5.3 Konduktivitas Thermal

Pronk dalam thesisnya, mengestimasi nilai konduktivitas *thermal ice slurry* menggunakan model yang diajukan oleh Taref (1940) untuk campuran cair - padatan :

$$k_{is} = k_{sol} \left( \frac{2k_{sol} + k_{es} - 2\xi_{es} (k_{sol} - k_{es})}{2k_{sol} + k_{es} + \xi_{es} (k_{sol} - k_{es})} \right) \tag{2.11}$$

Dimana :

$k_{is}$  = konduktivitas *thermal ice slurry* (W/mK)

$k_{es}$  = konduktivitas es (W/mK)

$k_{sol}$  = konduktivitas larutan (W/mK)

$\xi_{es}$  = fraksi volume es

Dengan konduktivitas es,  $k_{es}$  (W/mK) untuk jangkauan temperatur  $-100^{\circ}\text{C}$  sampai  $0.01^{\circ}\text{C}$ , ialah:

$$k_{es} = 2.23 - 9.7 \cdot 10^{-3} \cdot T + 4.7 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

## 2.5.4 Viskositas

Berbagai macam model untuk menentukan viskositas *ice slurry* telah dikembangkan dan nilainya ditentukan dari viskositas larutannya dan fraksi es yang terbentuk. Salah satu model yang paling akurat ialah model dari Thomas (1985), yaitu :

$$\mu_{is} = \mu_{sol} \left( 1 + 2.5 \cdot \xi_{es} + 10.05 \cdot \xi_{es}^2 + 0.00273 \cdot e^{(16.6 \cdot \xi_{es})} \right) \quad (2.12)$$

dimana :

$\mu_{is}$  = viskositas *ice slurry* (Pa.s)

$\mu_{sol}$  = viskositas larutan (Pa.s)

Validasi eksperiment dari model ini oleh Kauffeld (1999) menunjukkan error yang cukup besar untuk fraksi volume es diatas 0.2, diperkirakan bahwa pada fraksi volume es diatas 0.2, *ice slurry* bukan lagi fluida newtonian. Terdapat beberapa model untuk dinamika fluida *ice slurry* salah satunya ialah model yang diajukan oleh Lakhdar dan kemudian disusul Guilpart et all, memodelkan fluida non-Newtonian untuk *ice slurry* sebagai Oswalt tipe Power law.

$$\mu_{app} = \frac{\tau}{\left(\frac{dv}{dy}\right)} = K(\phi_{es}) \left(\frac{dv}{dy}\right)^{n(\phi_{es})-1} \quad (2.13)$$

Dengan

$$n(\phi_{es}) = 0.263 + \frac{0.737}{1 + \left(\frac{\phi_{es}}{0.112}\right)^{8.34}} ; \quad 0 < \phi_{es} < 0.28 \quad (2.14)$$

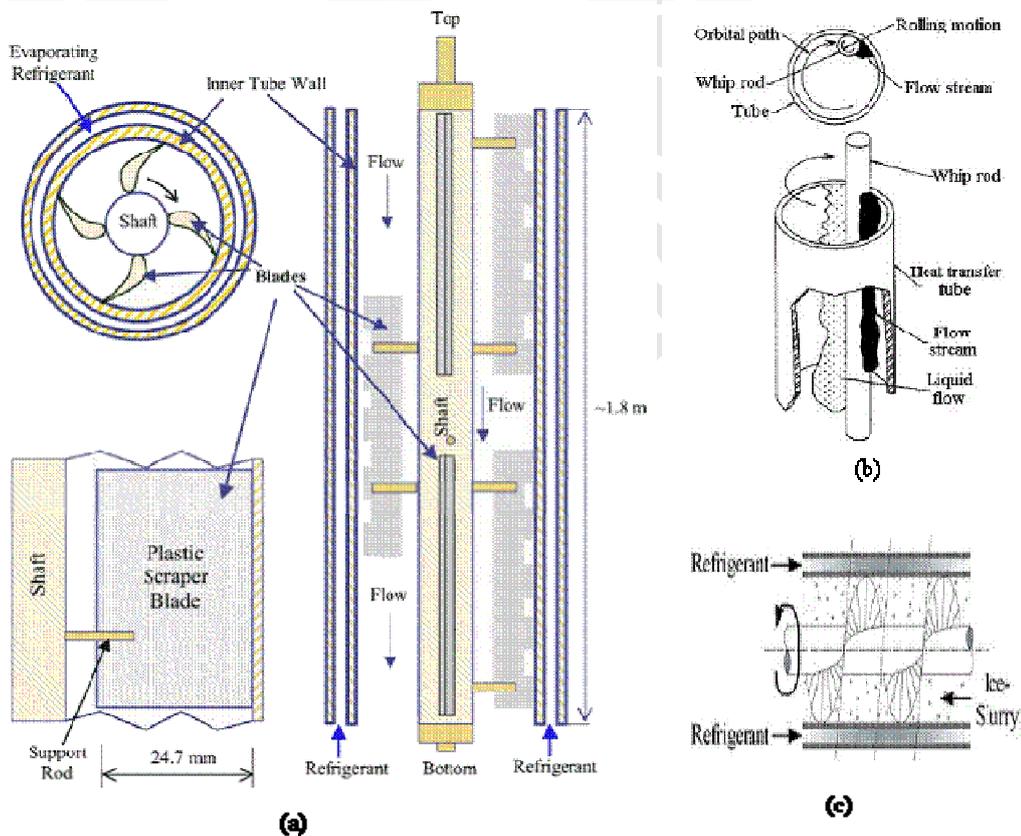
$$K(\phi_{es}) = e^{(-5.441 + 832.4 \cdot \phi_{es}^{2.5})} ; \quad 0 < \phi_{es} < 0.13 \quad (2.15)$$

$$K(\phi_{es}) = e^{(-6.227 + 16.487 \cdot \phi_{es}^{0.5})} ; \quad 0.13 < \phi_{es} < 0.28 \quad (2.16)$$

## 2.6 ADHESI ES PADA DINDING PERPINDAHAN KALOR

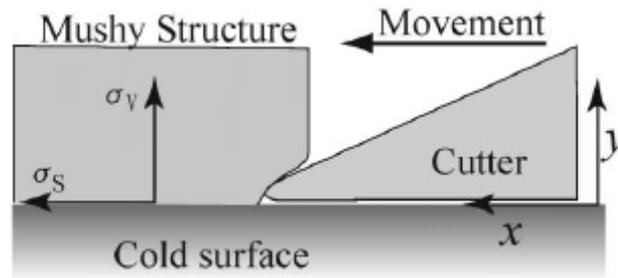
Es yang terbentuk pada *ice slurry* memiliki kecenderungan untuk menempel pada dinding alat penukar kalor, semakin tinggi perbedaan temperatur antara es dan dinding semakin besar pula gaya adhesinya. Fenomena kecenderungan es untuk menempel pada dinding disebut sebagai *ice scaling*. Sifat fisik dari es yang menempel pada dinding tidak sama dengan es murni karena teramati adanya lapisan *liquid like layer* antara es dengan dinding sehingga struktur padanya disebut struktur *mushy*. *Mushy* merupakan struktur yang memiliki konsentrasi es yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi es pada *ice slurry*.

Es yang menempel pada dinding ini akan meningkatkan resistansi termal sehingga proses perpindahan kalornya cenderung mengecil. Untuk mengatasi hal ini, biasanya pada *ice slurry generator* dipasang alat mekanis untuk menyapu es yang menempel pada dinding yang disebut *scraper*. Beberapa tipe alat penyapu *ice scaling* yang biasa dipergunakan dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 2.7. Beberapa tipe *ice slurry generator* (a) *Scraped surface heat exchanger*, (b) *Orbital path heat exchanger*, (c) *Scraper tipe screw*, (Pronk, 2006, hal. 112-114)

Untuk menyapu lapisan *mushy* dari permukaan diperlukan kerja yang lebih besar dari energi adhesi. Besarnya gaya pada *scraper* merupakan fungsi dari gaya adhesi persatuan luas dan modulus elastisitas yang besarnya dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan :



Gambar 2.8. Interaksi antara lapisan *mushy* dengan *scraper* (Ishikawa, 2002, hal. 211)

$$F_s = \frac{2LH\sigma_v^2}{E} \tan \alpha \frac{1 + \frac{\mu_2}{\tan \alpha + \mu_1}}{\left( \frac{1 - \mu_1 \tan \alpha}{1 + \mu_1 \tan \alpha} \right)^2} \quad (2.17)$$

dengan

$$\sigma_v = 0.127 \times 10^6 \cdot \frac{\phi_f - \phi_0}{\phi_f} \cdot \Delta t \quad (2.18)$$

dan

$$\phi_f = \frac{\phi_0 + \phi_w}{2} \quad (2.19)$$

Dimana :

L = panjang lapisan *Mushy* (m)

H = lebar *scraper* (m)

$\sigma_v$  = gaya adhesi persatuan luas

E = modulus elastisitas lapisan *mushy* (Pa)

$\alpha$  = sudut serang *scraper*

$\mu_1$  = koefisien gesek kinetis antara lapisan *mushy* dengan *scraper*

$\mu_2$  = koefisien gesek kinetis antara *scraper* dengan dinding

$\Delta t$  = waktu interval *scraper* menyapu *mushy* (s)

$\phi_f$  = konsentrasi larutan pada lapisan *mushy*

$\phi_w$  = konsentrasi larutan pada dinding perpindahan kalor

M.Ishikawa dkk, dari hasil penelitiannya menyatakan bahwa modulus elastisitas lapisan *mushy* memiliki nilai dalam kisaran yang sama dengan karet yaitu 10 MPa. [4]

## 2.7 TIPE ALIRAN PADA AGITATED VESSEL

Seperti halnya aliran dalam pipa lurus, *agitated vessel* juga memiliki tipe aliran laminar, transisi dan turbulent. Yang ditentukan oleh bilangan Reynolds, untuk *agitated vessel* bilangan Reynolds-nya memiliki bentuk

$$Re = \frac{\rho \cdot N \cdot D^2}{\mu} \quad (2.20)$$

dimana :

$N$  = kecepatan putar *impeler/auger* (rad/s)

$D$  = diameter *impeler* (m)

$\rho$  = densitas (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = viskositas (Pa.s)

Pada bilangan Reynolds rendah ( $Re < 10$ ), aliran *viscous* berkembang penuh didalam *vessel*, sedangkan pada Reynolds tinggi ( $Re > 10^4$ ) aliran turbulen.