

## BAB IV

### PERALATAN DAN PERBAIKAN SISTEM

#### 4.1 PERALATAN PENGUJIAN

Sistem refrigerasi *ice slurry generator* yang digunakan untuk pengujian ini terdapat pada laboratorium perpindahan kalor Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, Depok. Sistem ini merupakan sistem refrigerasi kompresi uap pada umumnya yang terdiri dari compressor, condenser, evaporator, dan alat ekspansi. Perbedaan utama pada sistem refrigerasi ini ialah terletak pada evaporatornya yang didesign khusus untuk mengambil kalor dari *liquid* (larutan biner) agar mencapai temperatur rendah sehingga larutan biner tersebut dapat membentuk slurry.

##### 4.1.1 Compressor

Merek/model : Tecumseh/ AJB5515EXD  
Daya : 1 HP  
Voltage/Hz : 230/50  
Refrigeran : R22  
Lubricant : *Alkylbeneze*  
Dimensi : Panjang 23 cm, lebar 15 cm dan tinggi 30 cm



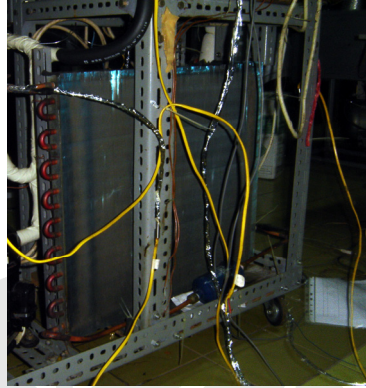
Gambar 4.1. Foto compressor

#### 4.1.2 Condenser

Tipe : Tube and Fins air cooled

Material : Tembaga

Fan : Maspion Electric (19 W)



Gambar 4.2. Foto condenser

#### 4.1.3 Expansion Valves

Penggunaan expansion valves pada sistem refrigerasi memiliki dua fungsi yaitu untuk mengontrol jumlah refrigerant yang masuk ke evaporator (laju aliran massa refrigerant) dan mempertahankan perbedaan tekanan antara condenser dan evaporator. Alat ekspansi yang digunakan ialah thermal ekspansion valve dengan probe bulb yang diletakkan pada suction line.

Merk : Danfoss

Model : tx2 68z3206



Gambar 4.3. Foto ekspansion valve

#### 4.1.4 Filter Dryer

*Filter dryer* adalah alat yang memiliki fungsi sangat penting, yaitu untuk menyingkirkan partikel-partikel yang berpotensi merusak sistem ketika beroperasi, seperti logam, debu, kotoran, hingga partikel yang dapat larut yang mungkin masuk ke dalam sistem ketika proses instalasi alat berlangsung. Benda tak diinginkan tersebut dapat mengganggu kerja sistem bahan hingga merusak alat-alat refrigerasi. Jenis yang digunakan:

Merek/model : Emerson/EK 163

Refrigeran : CFC, HCFC dan HFC



Gambar 4.4. Foto filter dryer

#### 4.1.5 Auger Dan Scraper

Kesuksesan dari proses pembentukan *ice slurry* bergantung terhadap keefektifan agitasi dan pencampuran dari fluida. Agitasi merupakan penciptaan gerakan pada fluida menggunakan agitator dalam pola arah tertentu, biasanya pola melingkar dalam suatu kontainer sedangkan pencampuran merupakan distribusi acak dari dua atau lebih phase yang pada awalnya terpisah. Tujuan dari agitasi ialah :

- a. mencampur partikel padat sehingga membentuk campuran suspensi
- b. mengaduk larutan homogeneus
- c. mendispersi gas dalam *liquid*
- d. mendispersi *liquid* sekunder yang tidak larut agar terbentuk emulsi atau suspensi halus
- e. mempromosikan *heat transfer* antara *liquid* dengan coil atau cooling jacket.

Sedangkan *scraper* berfungsi untuk meningkatkan *heat transfer* dengan cara menyapu atau menghancurkan lapisan *mushy* yang terjadi pada dinding *heat transfer* .

Tipe Agitator : Hellical Ribbon

Dimensi Agitator

Diameter : 220.2 mm

Tinggi : 250 mm

Material Agitator : Stainless steel

Tipe *Scraper* : Scraped surface

Material *Scraper* : High Density Polyethelene



Gambar 4.5. Foto *auger*/agitator yang telah dilengkapi *scraper*

#### 4.1.6 Motor DC

Berfungsi sebagai penggerak/pemutar agitator yang dihubungkan menggunakan V-Belt. Power line untuk motor DC ini dilengkapi dengan sirkuit motor controller untuk mengatur kecepatan putar motor dengan mengatur tegangan yang diberikan kepadanya.

Manufacture : New Power Electric USA

Daya Maksimum : 1 HP

Putaran Maksimum : 3000 rpm

Tegangan/Arus untuk operasi maksimum : 180 V/5.1 A DC



Gambar 4.6. Foto motor DC

## 4.2 ALAT UKUR

### 4.2.1 Temperatur

Pengukuran temperatur di beberapa titik, mempergunakan beberapa thermocouple tipe-K dan dua alat pengukur temperatur digital untuk mengambil tegangan pada *termocouple* dan menampilkannya dalam temperatur.

Merek/model : FLUKE / 189

*Accuracy* : +/- 1<sup>0</sup>C

*Environment temperature range* : 0<sup>0</sup>C-60<sup>0</sup>C

Tipe *termocouple* : Tipe K

Presisi : satu angka dibelakang koma



Gambar 4.7. Foto multimeter/temperatur digital

Merk : Yokogawa Electric Works, Ltd

Model : YEW / 3874

Presisi : satu angka dibelakang koma



Gambar 4.8. Foto temperatur recorder

Sebelum dipasangkan pada titik ukur, *termocouple* tipe K yang akan digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu agar dapat menunjukkan temperatur dengan nilai yang benar. Alat ukur yang digunakan sebagai referensi ialah termometer standar air raksa, untuk tujuan kalibrasi ini digunakan satu titik temperatur yaitu titik didih air. Selisih antara hasil pengukuran dari *termocouple* dengan temperatur standar akan ditambahkan pada pengolahan data, hasil kalibrasinya sebagai berikut:

Tabel IV.1. Kalibrasi *termocouple*

| Termometer Standar | <i>Termocouple</i> |       |        |        |
|--------------------|--------------------|-------|--------|--------|
|                    | Tsol1              | Tsol2 | Twall1 | Twall2 |
| 99.7               | 99.5               | 99.3  | 99.4   | 99.2   |
| delta              | 0.2                | 0.4   | 0.3    | 0.5    |

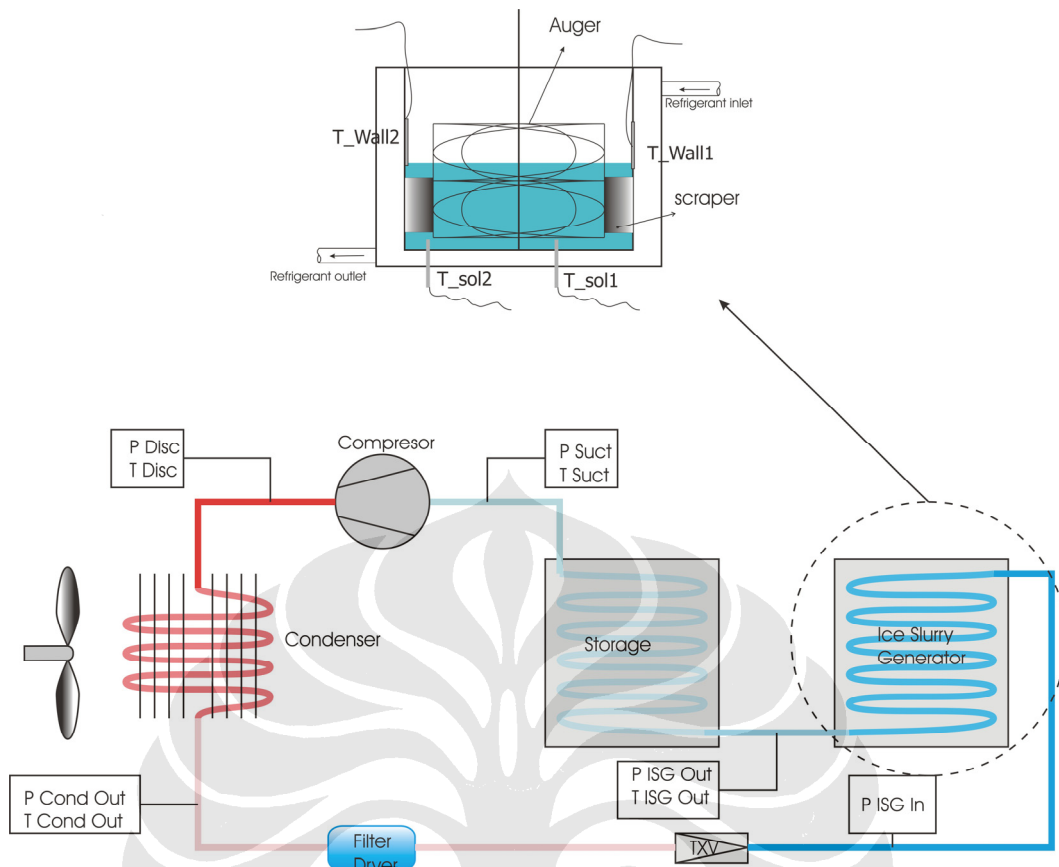
#### 4.2.2 Tekanan

Tekanan diukur mempergunakan dua tipe pressure gauge analog, yaitu:

- High pressure line: 0-35 bar atau 0-500 psi
- Low pressure line: 0-17.5 bar atau 0-250 psi

Posisi dari *termocouple* dan pressure gauge dapat dilihat pada gambar dibawah:





Gambar 4.9. Skematik sistem refrigerasi ISG dan peletakan piranti ukur (pressure gauge dan thermocouple)

Keterangan gambar 4.9 :

- P\_ISG\_In = Pressure gauge pada jalur masuk ISG
- P\_ISG\_Out = Pressure gauge pada jalur keluar ISG
- T\_ISG\_Out = *Termocouple* pada jalur keluar ISG
- P\_Suct = Pressure gauge pada jalur suction
- T\_Suct = *Termocouple* pada jalur suction
- P\_Disc = Pressure gauge pada jalur discharge
- T\_Disc = *Termocouple* pada jalur discharge
- P\_Cond\_Out = Pressure gauge pada jalur keluar dari condenser
- T\_Cond\_out = *Termocouple* pada jalur keluar dari condenser
- T\_sol,1 = *Termocouple* 1 pada larutan
- T\_sol,2 = *Termocouple* 2 pada larutan
- T\_wall,1 = *Termocouple* 1 pada dinding *heat transfer* ISG
- T\_wall,2 = *Termocouple* 2 pada dinding *heat transfer* ISG

### 4.2.3 Kelistrikan

Untuk tujuan pengukuran tegangan AC atau DC dipergunakan multimeter digital, untuk pengukuran arus DC dipergunakan ampere meter analog sedangkan untuk pengukuran arus AC dipergunakan digital clamp meter.

AC Clamp-On Ammeter

Merk : Krisbow

Model : KW06-287

Accuracy : 2%



Gambar 4.10. Foto clamp meter

#### 4.2.4 Kecepatan Putar

Pengukuran kecepatan putar dilakukan dengan menggunakan tachometer yang diletakkan pada pusat poros motor sehingga ia akan ikut berputar dan dapat menentukan kecepatan putar tersebut.

Merk : Teclock

Jangkauan : mode 1 (0-1000 rpm)

mode 2 (1000-10000 rpm)



Gambar 4.11. Foto tachometer

### 4.3 PERBAIKAN SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY GENERATOR*

Pada awal pengujian diketahui bahwa sistem refrigerasi ini mengalami kebocoran pada beberapa titik. Untuk mencari letak kebocoran, penulis menggunakan dua cara, yaitu :

#### 4.3.1 Pengujian Tidak Merusak

Pencarian kebocoran menggunakan cara ini merupakan yang paling mudah diterapkan dan tidak perlu merusak sistem refrigerasi, sehingga merupakan cara yang pertama kali digunakan. Caranya yaitu dengan mengoleskan air sabun/shampo pada jalur refrigerant, apabila air sabun ini



melapisi titik yang bocor maka akan terjadi gelembung-gelembung pada titik itu. Namun cara ini hanya dapat mencari kebocoran pada jalur yang dapat diolesi air sabun seperti pipa tembaga, untuk jalur yang tertutup seperti evaporator dan condenser, cara ini tidak dapat diterapkan. Melalui cara ini diketahui bahwa terdapat dua kebocoran yaitu pada suction line dan jalur setelah kondenser, semuanya terletak pada las-an antara thermocouple tipe K dan pipa tembaga. Thermocouple ini digunakan untuk mengukur temperatur refrigerant pada penelitian sebelumnya, tampaknya diinginkan untuk mengukur temperatur dengan cara kontak langsung dengan refrigerant. Namun karena casing thermocouple ini terbuat dari material yang berbeda dengan pipa tembaga maka hasil las-an tidak kuat. Langkah perbaikan yang dilakukan ialah dengan mencabut thermocouple tersebut dari pipa tembaga dan menutupnya dengan cara dilas. Untuk selanjutnya pengukuran temperatur dilakukan dengan thermocouple yang hanya ditempelkan pada sisi luar pipa tembaga yang sebelumnya telah dibersihkan (diamplas) dan diisolasi dari lingkungan menggunakan thermoflex untuk daerah tekanan rendah dan aluminium foil untuk daerah tekanan tinggi.

#### 4.3.2 Pengujian Merusak

Untuk memastikan bahwa kebocoran telah teratasi, sistem kembali diberikan tekanan namun kali ini tidak menggunakan refrigerant melainkan udara atmosfer melalui kompresor *eksternal* agar tidak merusak lingkungan apabila sistem masih bocor. Ternyata kebocoran masih terjadi namun pada daerah yang lain. Setelah semua pipa diyakini tidak ada kebocoran, tersisa dua tempat yang belum diperiksa yaitu evaporator/*ice slurry generator* dan condenser. Pemeriksaan kedua daerah ini dilakukan dengan memotong pipa tembaga untuk dipasangkan *double nipple* dan pentil sehingga jalur pada daerah ini terisolir. Kemudian diberikan tekanan, apabila bocor tentu tekanan pada pressure gauge akan menurun. Selanjutnya diketahui bahwa titik kebocoran terjadi pada condenser dan untuk melihat titik kebocoran, condenser direndam dalam air, tampak bahwa kebocoran terjadi pada beberapa titik dan tidak mungkin untuk

diperbaiki. Solusinya ialah dengan mengganti condenser AC *window* yang bocor (gambar 4.12) dengan condenser AC *outdoor* bekas merk National untuk daya 1½ HP seperti yang terlihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.12. Foto condenser lama yang mengalami kebocoran

Setelah condenser baru di-*instal* dan dicek tidak terjadi kebocoran, maka langkah terakhir ialah memastikan bahwa condenser baru dapat membuang kalor dengan baik dan melakukan subcool. Pengujian dilakukan dengan beban pendinginan optimal yaitu dengan putaran *auger* 250 rpm, dan volume larutan biner 6 liter dengan fraksi massa awal 5%, hasil pengujian dapat dilihat pada tabel dibawah:

Tabel IV.2. Uji performa condenser baru

| Waktu (menit) | P_ISG_in (Bar) | P_Disc (Bar) | T_Disc (°C) | P_Cond_out (Bar) | T_Cond_out (°C) | T_Bub (°C) | Subcool (°C) |
|---------------|----------------|--------------|-------------|------------------|-----------------|------------|--------------|
| 10            | 2.62           | 13.8         | 81.4        | 13.44            | 33.1            | 34.68      | 1.58         |
| 20            | 2.41           | 13.8         | 85.7        | 13.44            | 32.7            | 34.68      | 1.98         |
| 30            | 2.21           | 13.8         | 92          | 13.44            | 33              | 34.68      | 1.68         |
| 40            | 2.07           | 13.8         | 94          | 13.44            | 34              | 34.68      | 0.68         |
| 50            | 1.93           | 13.44        | 95          | 13.31            | 33.9            | 34.3       | 0.4          |
| 60            | 1.8            | 13.44        | 96.6        | 13.31            | 34.2            | 34.3       | 0.1          |
| 75            | 1.72           | 13.44        | 98.7        | 13.31            | 34.1            | 34.3       | 0.2          |
| 85            | 1.72           | 14.13        | 101.6       | 13.86            | 35.3            | 35.73      | 0.43         |
| 95            | 1.72           | 14.13        | 103         | 13.8             | 35.2            | 35.73      | 0.53         |
| 105           | 1.72           | 13.99        | 104         | 13.8             | 35              | 35.73      | 0.73         |
| 115           | 1.72           | 13.99        | 105.3       | 13.8             | 34.8            | 35.73      | 0.93         |

Keterangan :

T\_Bub = Temperatur saturasi pada tekanan P\_Cond\_Out

Subcool = T\_Bub – T\_Cond\_Out

Dari tabel IV.2 dapat diketahui bahwa condenser baru telah dapat mengkondensasi R22 dan melakukan subcool, namun subcool yang

berhasil dicapai ketika sistem mendekati steady tergolong rendah. Penyebabnya ialah fan yang digunakan tidak mampu menghasilkan laju aliran yang sesuai untuk condenser tipe ini.

#### 4.4 PROSEDUR PENGUJIAN

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh *scraper* terhadap perpindahan panas yang terjadi pada *ice slurry generator* apabila dibandingkan dengan sistem *ice slurry generator* tanpa menggunakan *scraper*. Pengambilan data (temperatur dan tekanan) dilakukan dari awal sampai larutan biner telah berubah menjadi suspensi *ice slurry* yang ditandai dengan kondisi dimana temperaturnya lebih rendah dari titik beku larutan dengan fraksi massa awal tertentu. Larutan biner yang digunakan merupakan campuran antara air dengan ethylene glycol. Variasi yang dilakukan pada pengambilan data ini yaitu berupa variasi fraksi massa ethylene glycol mulai dari 7%, 10%, 12% dan 15%, selain itu kecepatan putar *auger* juga divariasikan mulai dari 100, 150, 200, dan 250 rpm untuk fraksi massa 7%. Prosedur pengujiannya sbb:

- 1) Pembuatan larutan biner, Pembuatan larutan biner dengan fraksi massa tertentu menggunakan alat bejana ukur kapasitas 6 Liter dan 250 mL. Dan fraksi massa dihitung menggunakan formula :

$$\phi_0 = \frac{m_{EG}}{m_{EG} + m_{air}} = \frac{\rho_{EG} \cdot V_{EG}}{\rho_{EG} \cdot V_{EG} + \rho_{air} \cdot V_{air}}$$

Dimana :

$\phi_0$  = fraksi massa larutan ethylene glycol

$\rho_{EG}$  = massa jenis ethylene glycol pada temperatur 30°C

$V_{EG}$  = volume ethylene glycol (L)

$\rho_{air}$  = massa jenis air pada temperatur 30°C

$V_{air}$  = volume air (L)

Dengan massa jenis ethylene glycol pada temperatur 30°C adalah 1.104 kg/L dan massa jenis air pada temperatur 30°C adalah 0.996 kg/L. [9]

- 2) Pengisian Larutan biner, larutan biner dengan fraksi massa yang telah ditentukan dimasukkan kedalam tangki *ice slurry generator*.

- 3) Pengaturan kecepatan putar *auger*, pengaturan kecepatan ini dilakukan dengan mengatur besarnya tegangan yang diberikan kepada motor DC menggunakan sirkuit elektronik motor *controller* dan mengecek kecepatan putar motor menggunakan tachometer.
- 4) Menjalankan sistem refrigerasi, setelah kecepatan yang diinginkan tercapai, sistem refrigerasi dapat mulai dinyalakan. Pertama kali yang dijalankan ialah fan condenser baru kemudian menjalankan compresor.
- 5) Mencatat perubahan temperatur dan tekanan dengan selang waktu 5 atau 10 menit untuk temperatur pada *ice slurry generator* dan sekitar 10 menit untuk tekanan dan temperatur pada sistem refrigerasi. Pencatatan waktu ini berlangsung sampai terbentuknya *ice slurry* yang ditandai dengan kondisi temperatur *ice slurry* yang steady.

#### 4.5 METODE PENGOLAHAN DATA

Parameter yang dijadikan pembanding pada setiap pengujian ialah laju perpindahan kalor rata-rata,  $\bar{Q}$  (Watt). Untuk menghitung laju perpindahan kalor ini diasumsikan bahwa temperatur larutan berada pada temperatur rata-rata hasil pengukuran temperatur pada dua titik dan untuk menghitung sifat termodinamika larutan dan *ice slurry* digunakan rumus-rumus dari literatur.

## BAB V

### PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 5.1 TUJUAN PENGUJIAN

Tujuan pengujian ini ialah untuk melihat apakah hasil rancangan *scraper* dapat mencapai tujuannya yaitu untuk mengurangi adhesi es pada dinding *heat transfer* dan meningkatkan laju perpindahan kalor. Untuk kasus pertama yang diamati ialah ada tidaknya lapisan es pada dinding *heat transfer* dari *ice slurry generator* setelah *ice slurry* mencapai temperatur setimbang dan untuk mengetahui laju perpindahan kalor diperhatikan profil kurva temperatur dari *ice slurry* terhadap waktu.

#### 5.2 PENGOLAHAN DATA

Pengolahan data disini bertujuan mengetahui laju perpindahan kalor rata-rata pada fase *liquid* dan fase *liquid-ice*, sehingga terdapat suatu parameter yang dapat membandingkan satu modus pengujian dengan modus pengujian lainnya. Pada semua modus pengujian massa air yang digunakan ialah 7.78 kg dan luas permukaan dinding perpindahan kalor yang tertutupi air untuk massa air sebesar ini ialah 0.121 m<sup>2</sup>.

##### 5.2.1 Titik Beku Larutan

Titik beku larutan ethylene glycol dapat diestimasi menggunakan persamaan:

$$T_{eq}[\phi_0] = -0.2869 \cdot (\phi_0 \cdot 100) - 5.45 \cdot 10^{-3} \cdot (\phi_0 \cdot 100)^2 + 1.23 \cdot 10^{-4} \cdot (\phi_0 \cdot 100)^3 - 8.09 \cdot 10^{-6} \cdot (\phi_0 \cdot 100)^4 + 8.911 \cdot 10^{-8} \cdot (\phi_0 \cdot 100)^5 \quad (5.1)$$

Oleh karena pengukuran temperatur dilakukan mulai dari temperatur awal (fase *liquid*) dan karena perhitungan sifat termodinamika untuk fase *liquid*

dan fase *liquid-ice* berbeda maka dalam pengolahan datanya, dipisah berdasarkan fasenya masing-masing.

### 5.2.2 Fase *Liquid*

Pengolahan data untuk fase *liquid* diambil dari menit ke-0 sampai menit tertentu dimana temperatur rata-rata larutan mendekati temperatur titik bekunya

- Temperatur larutan rata-rata

Diasumsikan temperatur borongan dari larutan merupakan temperatur rata-rata dari dua titik pengukuran temperatur, yaitu

$$\bar{T}_{sol} = \frac{T_{sol,1} + T_{sol,2}}{2}$$

- Temperatur dinding rata-rata

Dari hasil pengamatan diketahui bahwa pada 2 tempat pengukuran temperatur dinding terdapat lapisan es apabila larutan telah melewati titik bekunya dikarenakan letak titik pengukuran ini bukan merupakan daerah yang disapu oleh *scraper* sehingga temperaturnya akan lebih dingin dibandingkan temperatur dinding yang disapu oleh *scraper* (lihat gambar 5.2). Berarti pada fase *liquid ice* temperatur dinding hasil pengukuran tidak dapat dijadikan temperatur rata-rata dinding namun pada fase *liquid*, nilai pengukuran temperatur dinding pada dua titik tersebut dapat mewakili temperatur dinding. Temperatur dinding rata-rata untuk fase *liquid* merupakan temperatur rata-rata dari hasil pengukuran temperatur dinding pada dua titik, yaitu:

$$\bar{T}_{wall} = \frac{T_{wall,1} + T_{wall,2}}{2}$$

- Massa jenis larutan

Massa jenis larutan dihitung menggunakan persamaan 2.5 dan dievaluasi pada  $\bar{T}_{sol}$ ,

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



Dengan koefisien  $\phi_m$ ,  $T_m$  dan  $C_{ij}$  untuk larutan biner ethylene glycol dapat dilihat pada tabel 2.1

- Kalor jenis larutan,

Sama seperti perhitungan massa jenis larutan, kalor jenis larutan diestimasi menggunakan persamaan 2.5

$$c_{p,sol} = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^3 \left( C_{ij} (\phi_0 \cdot 100 - \phi_m)^i \cdot (T - T_m)^j \right)$$

Dengan koefisien  $\phi_m$ ,  $T_m$  dan  $C_{ij}$  untuk larutan biner ethylene glycol dapat dilihat pada tabel 2.1

- Laju perpindahan kalor rata-rata,

Laju perpindahan kalor rata-rata untuk fase *liquid*, dihitung berdasarkan hukum konservasi energi pada kontrol volume,

$$\begin{aligned} Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} &= Q_{store} \\ 0 - Q_{out} + 0 &= Q_{store,larutan} + Q_{store,auger} \\ -Q_{out} &= m_{sol} \cdot c_{p,sol} \cdot \frac{dT}{dt} + m_{auger} \cdot c_{p,steel} \cdot \frac{dT}{dt} \\ -\int_t^{t+} Q_{out} \cdot dt &= m_{sol} \cdot \int_{T(t)}^{T(t+)} c_{p,sol} \cdot dT + m_{auger} \cdot \int_{T(t)}^{T(t+)} c_{p,steel} \cdot dT \end{aligned} \quad (5.2)$$

Dengan mengasumsikan  $c_{p,steel}$  konstan  $\approx 480$  J/kg.K, persamaan 5.2 menjadi

$$\bar{Q}_{out} = - \frac{\left\{ m_{sol} \cdot \int_{T(t)}^{T(t+)} c_{p,sol} \cdot dT + m_{auger} \cdot c_{p,steel} \cdot \Delta T \right\}}{\Delta t \cdot 60} \quad (5.3)$$

Fungsi  $c_{p,sol}$  terhadap T didapatkan dengan bantuan software microsoft excel untuk temperatur larutan rata-rata diatas titik beku larutan.

- Koefisien perpindahan kalor rata-rata

Persamaan 5.2 diatas dapat dikembangkan menjadi

$$-\bar{U} \cdot A \cdot \int_t^{t+} (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{wall}) dt = m_{sol} \cdot \int_{T_{sol,t}}^{T_{sol,t+}} c_p dT + m_{auger} \cdot \int_{T_{sol,t}}^{T_{sol,t+}} c_{p,steel} dT$$

$$\bar{U} = \frac{m_{sol} \cdot \int_{T_{sol,t}}^{T_{sol,t+}} c_{p,sol} dT + m_{auger} \cdot c_{p,steel} (T_{sol,t+} - T_{sol,t})}{-A \cdot \int_t^{t+} (\bar{T}_{sol} - \bar{T}_{wall}) dt \cdot 60} \quad (5.4)$$

Untuk mengevaluasi integrasi pada persamaan di sebelah kiri, kita harus tahu fungsi  $\bar{T}_{sol}$  terhadap t dan fungsi  $\bar{T}_{wall}$  terhadap t. Hal ini dapat dilakukan dengan bantuan software microsoft excel untuk mencari fungsi polynomial kedua hal tersebut.

### 5.2.3 Fase *Liquid-Ice*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, karena pada fase *liquid ice* temperatur dinding hasil pengukuran tidak dapat mewakili temperatur dinding yang dilewati *scraper* maka untuk fase *liquid ice* tidak dapat diperkirakan koefisien perpindahan kalor dan parameter yang digunakan sebagai pembanding ialah laju perpindahan kalor.

- Massa jenis *ice slurry*

Massa jenis *ice slurry* untuk larutan ethylene glycol dihitung menggunakan persamaan 2.8,

$$\rho_{is} = \frac{1}{\left[ \frac{\phi_{es}}{\rho_{es}} + \frac{(1-\phi_{es})}{\rho_{sol}} \right]}$$

Dengan massa jenis es

$$\rho_{es} = 917 + 1.73 \cdot 10^{-4} T$$

Fraksi massa es dihitung dengan mensubstitusikan persamaan 2.3 ke persamaan 2.4 sehingga memiliki bentuk

$$\phi_{es} = \frac{\left\{ (-3.409 \cdot 10^{-2} T - 0.1429 \cdot 10^{-2} T^2 - 4.401 \cdot 10^{-5} T^3 - 7.259 \cdot 10^{-7} T^4 - 4.809 \cdot 10^{-9} T^5) - \phi_0 \right\}}{-3.409 \cdot 10^{-2} T - 0.1429 \cdot 10^{-2} T^2 - 4.401 \cdot 10^{-5} T^3 - 7.259 \cdot 10^{-7} T^4 - 4.809 \cdot 10^{-9} T^5}$$

- Kalor jenis *ice slurry*

Dari persamaan 2.10, yaitu

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

Penjabaran dari persamaan ini sebagai berikut,

Perubahan fraksi massa es terhadap temperatur ialah

$$\frac{\partial \phi_{es}}{\partial T} = \frac{d\phi_{es}}{d\phi_s} \cdot \frac{d\phi_s}{dT}$$

mengingat

$$\phi_{es} = \frac{\phi_s - \phi_0}{\phi_s}$$

dan

$$\phi_{es} = -3.409 \cdot 10^{-2} T - 0.1429 \cdot 10^{-2} T^2 - 4.401 \times 10^{-5} T^3 - 7.259 \times 10^{-7} T^4 - 4.809 \times 10^{-9} T^5$$

sehingga

$$\frac{\partial \phi_{es}}{\partial T} = \frac{\phi_0}{\phi_s^2} \cdot (-3.409 \cdot 10^{-2} - 0.2858 \cdot 10^{-2} \cdot T - 13.203 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 29.036 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 24.045 \cdot 10^{-9} \cdot T^4)$$

Enthalpi es pada  $0^\circ \text{C}$ ,  $h_{es} \{0^\circ \text{C}\} = 333340 \text{ J/kg}$

Untuk mengintegrasikan kalor jenis es dipergunakan persamaan

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

Sedangkan untuk mengintegrasikan kalor jenis larutan, kita harus tahu fungsi kalor jenis larutan terhadap temperatur larutan dibawah  $0^\circ \text{C}$ . Hal ini dilakukan dengan bantuan software microsoft excel untuk mendapatkan fungsi polynomialnya. Dan enthalpi larutan ethylene glycol dengan fraksi massa tertentu pada  $0^\circ \text{C}$ , didapatkan dari persamaan 2.7, yaitu

$$h_{sol} \{0^\circ \text{C}\} = \sum_{i=0}^5 \sum_{k=0}^4 (C_{ij} (-31.1615)^i \cdot (-6.3333)^k)$$

Dengan koefisien  $C_{ij}$ ,  $i$  dan  $j$  berdasarkan pada tabel 2.1

- Laju perpindahan kalor rata-rata

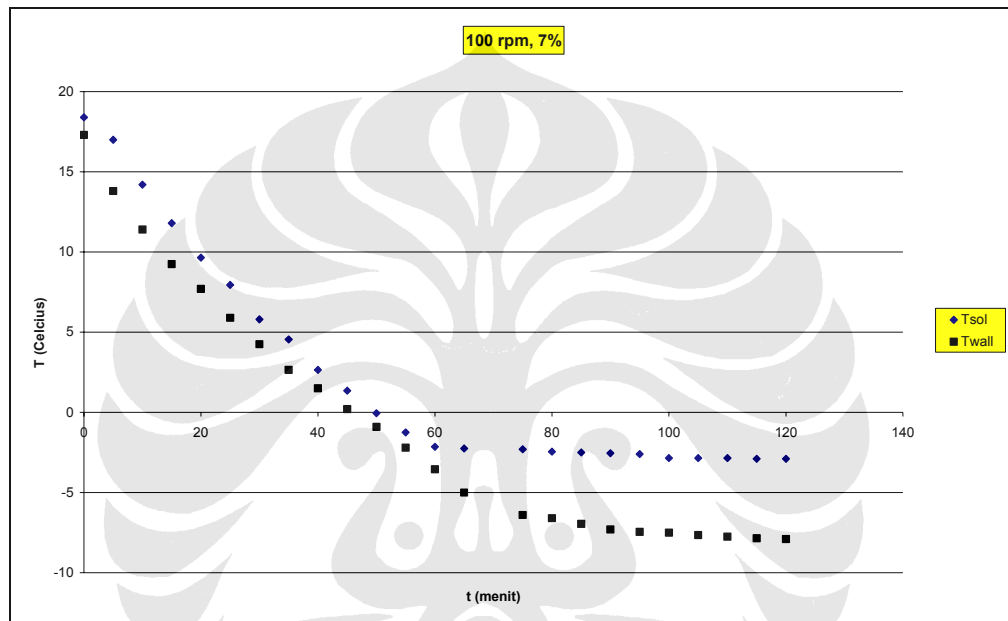
Sama seperti pada fase *liquid*, laju perpindahan kalor rata-rata untuk fase *liquid ice* dihitung berdasarkan persamaan 5.3

$$\bar{Q}_{out} = - \frac{\left\{ m_{sol} \cdot \int_{T(t)}^{T(t+)} c_{p, is} \cdot dT + m_{auger} \cdot c_{p, steel} \cdot \Delta T \right\}}{\Delta t \cdot 60} \quad (5.5)$$

Dengan fungsi  $c_{p, is}$  terhadap T didekati menggunakan software microsoft excel yaitu berupa persamaan polynomial untuk temperatur dibawah titik beku larutan.

### 5.3 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

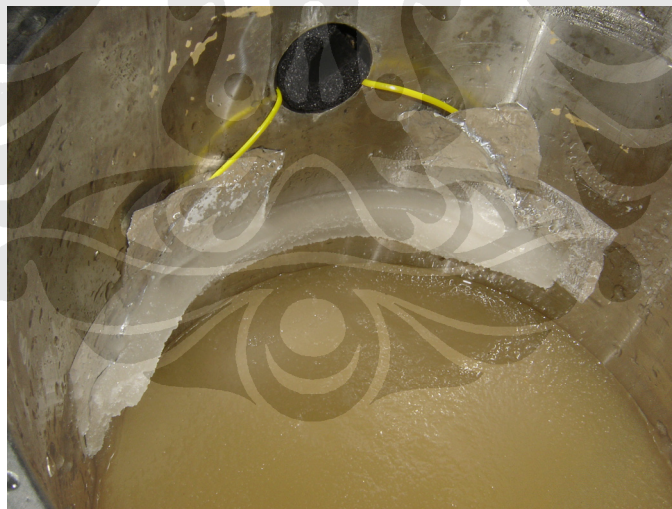
#### 5.3.1 Pengaruh Kecepatan Terhadap Laju Perpindahan Kalor



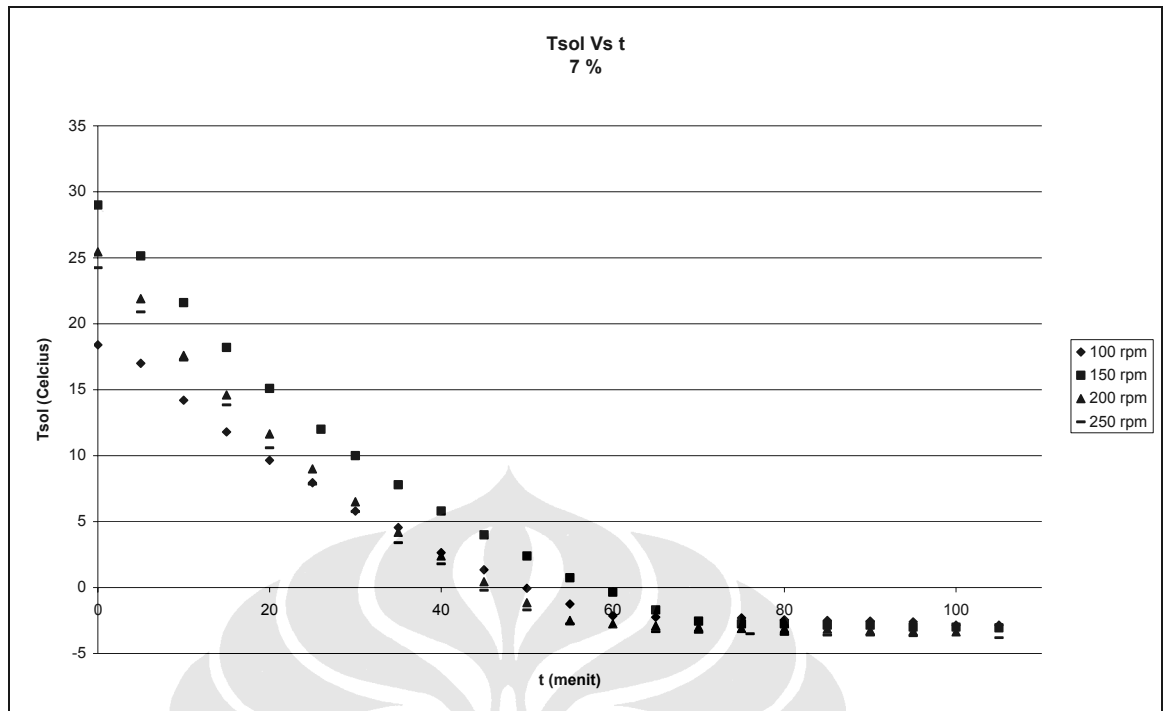
Gambar 5.1. Temperatur vs waktu untuk konsentrasi 7% dan putaran *auger* 100 rpm

Pada gambar 5.1. diatas dapat dilihat kurva temperatur larutan rata-rata,  $\bar{T}_{sol}$  dan temperatur dinding rata-rata,  $\bar{T}_{wall}$  terhadap waktu untuk konsentrasi awal 7% dan kecepatan *auger* 100 rpm dengan temperatur awal larutan ialah 18.4 °C dan temperatur awal dinding ialah 17.3 °C. Kurva diatas dapat dibagi menjadi dua yaitu fase *liquid* dan fase *liquid-ice*, dari hasil pengukuran temperatur untuk kondisi ini waktu yang diperlukan untuk mencapai titik beku larutan yaitu -2.25 °C sekitar 60 menit. Ketika larutan masih berada pada fase cair (antara 0 sampai 60 menit), laju perubahan temperatur larutan terhadap waktu relatif lebih tinggi dibandingkan ketika larutan telah melewati temperatur titik beku, hal ini dikarenakan pada daerah *liquid-ice*, beberapa bagian dari air akan berubah

menjadi es, perubahan fase ini memerlukan penyerapan energi yang besar sehingga energi kalor yang diserap oleh sistem refrigerasi sebagian besar digunakan untuk merubah fase dibandingkan untuk menurunkan temperatur. Oleh karena sebagian air telah berubah menjadi es maka konsentrasi larutan akan meningkat sehingga titik beku akan menurun, yang juga berarti untuk meningkatkan konsentrasi es lebih besar lagi diperlukan temperatur yang lebih rendah. Semakin rendah temperatur *ice slurry* untuk suatu konsentrasi awal tertentu maka akan semakin besar pula konsentrasi esnya. Teramati pula perbedaan temperatur antara larutan dan dinding pada daerah *liquid* berkisar dari 0.85 sampai 2.55 °C sedangkan untuk fase *liquid-ice* berkisar antara 2.75 sampai 5. Perbedaan temperatur yang besar ketika larutan memasuki daerah *liquid-ice* disebabkan peletakan *termocouple* yang tidak berada pada dinding yang dikenai *scraper* sehingga pada daerah ini akan timbul lapisan es pada tempat pengukuran temperatur dinding, sebagaimana yang terlihat pada gambar 5.2. Sehingga dapat disimpulkan untuk daerah *liquid-ice* temperatur dinding yang di ukur tidak dapat dijadikan temperatur rata-rata dinding secara keseluruhan.



Gambar 5.2. Foto lapisan es di titik pengukuran temperatur dinding pada kecepatan 100 rpm



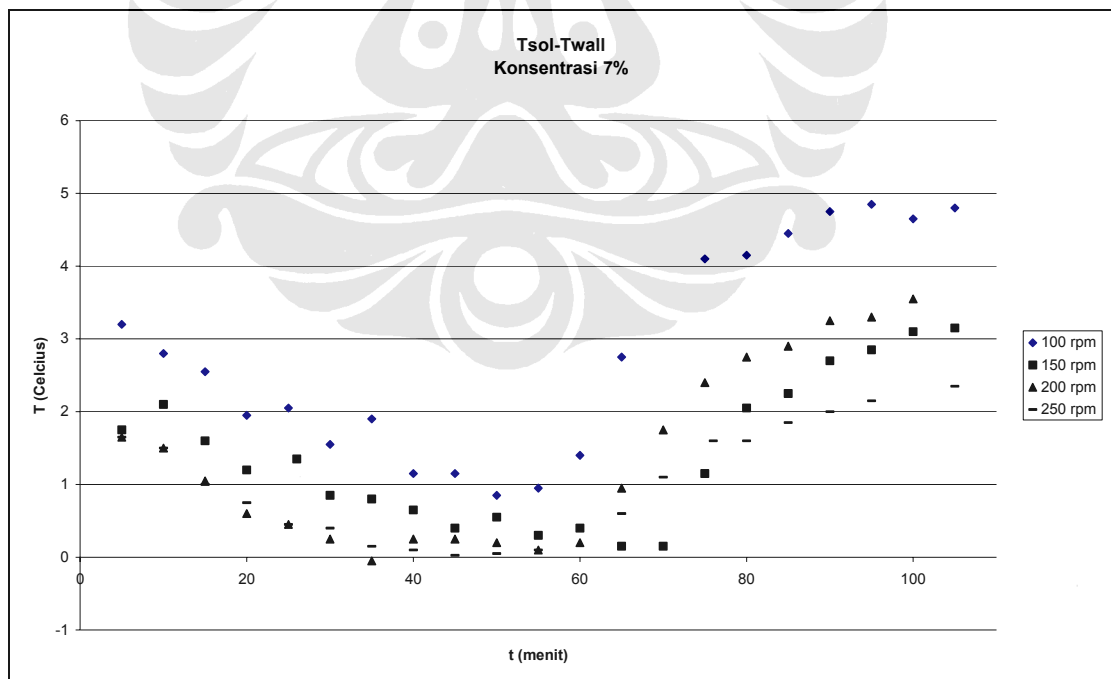
Gambar 5.3. Perbandingan temperatur larutan vs waktu untuk konsentrasi awal 7% pada berbagai kecepatan

Dari gambar 5.3. diatas dapat dilihat perbandingan temperatur larutan terhadap waktu untuk kecepatan putar *auger* 100, 150, 200, dan 250 rpm selama 105 menit. Temperatur awal untuk masing-masing mode pengujian tidak sama, hal ini disebabkan waktu yang diperlukan untuk temperatur larutan kembali mencapai temperatur ruang sangat lama (kurang lebih 2 hari). Meskipun demikian masih dapat terlihat perbedaan dari masing-masing pengujian dengan memperhatikan laju perubahan temperatur dan temperatur akhirnya. Dari grafik diatas terlihat, waktu yang diperlukan untuk mencapai titik beku pada masing-masing mode pengujian tidak sama hal ini dikarenakan perbedaan koefisien perpindahan kalor akibat perbedaan kecepatan *auger* dan perbedaan temperatur awal.

Untuk mode pengujian dengan kecepatan putar 150 rpm dan temperatur awal 29 °C, waktu yang diperlukan untuk mencapai titik beku ialah sekitar 65 menit dan temperatur akhir -3.05 °C. Untuk kecepatan putar 200 rpm dengan temperatur awal larutan 25.4 °C, waktu yang diperlukan untuk mencapai titik beku sekitar 50 menit dan temperatur akhir yaitu -3.35. Pada kecepatan putar 250 rpm dengan temperatur awal 24 °C titik beku tercapai setelah menit 50 dan temperatur



akhir *ice slurry* mencapai  $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menandakan bahwa koefisien perpindahan kalor pada fase *liquid* dan *liquid-ice* cenderung semakin besar seiring dengan meningkatnya kecepatan putar *auger* sebagaimana yang terlihat pada gambar 5.3 dimana semakin cepat putaran *auger* akan semakin curam pula kurva temperatur larutan. Perbandingan laju perubahan temperatur untuk fase *liquid* pada kecepatan 200 dan 250 rpm tampak tidak memiliki perbedaan yang tajam kemungkinan hal ini disebabkan daya serap kalor maksimum yang dimiliki oleh sistem refrigerasi telah tercapai pada kecepatan sekitar 200 rpm sehingga meningkatkan kecepatan diatas 200 rpm tidak lagi menghasilkan penurunan temperatur yang berarti. Selain itu terdapat hal yang menarik dari grafik diatas yaitu titik beku larutan yang ditandai dengan titik dimana laju perubahan temperatur mulai datar berbeda-beda pada setiap mode pengujian, seolah-olah dengan meningkatnya kecepatan putar *auger* titik beku larutan akan menurun. Kemungkinan hal ini disebabkan terjadinya penguapan ethelene glycol pada larutan sehingga fraksi massa awal larutan akan berbeda dan karena selang waktu antara satu pengujian dengan pengujian lainnya cukup lama (antara satu sampai dua hari) maka jumlah ethelene glycol yang menguap akan relatif cukup besar.



Gambar 5.4. Kurva selisih temperatur larutan rata-rata dengan temperatur dinding rata-rata terhadap waktu

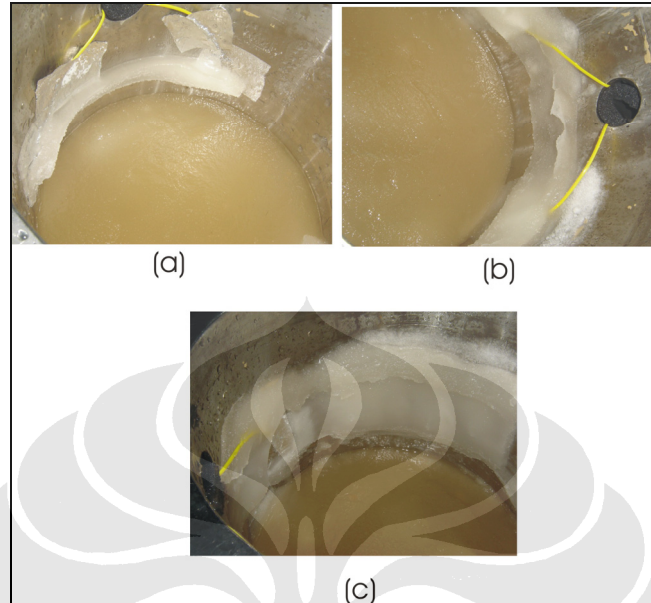
Besarnya koefisien perpindahan kalor pada dinding tidak hanya terlihat oleh besar kecilnya laju perubahan temperatur larutan terhadap waktu namun juga terlihat dari perbedaan temperatur antara larutan dengan dinding, semakin kecil perbedaan ini maka dapat diprediksi koefisien perpindahan kalor yang besar. Dari gambar 5.3. diatas dapat dilihat bahwa perbedaan temperatur terbesar terjadi pada mode pengujian 100 rpm sedangkan perbedaan temperatur terkecil terjadi pada kecepatan 200 dan 250 rpm untuk fase *liquid* sedangkan untuk fase *liquid-ice* terjadi untuk kecepatan 250 rpm. Perbedaan temperatur yang kecil antara kecepatan 200 dan 250 rpm pada fase *liquid* menandakan bahwa sistem refrigerasi tidak mampu menyerap kalor lebih besar lagi karena telah mendekati  $Q_{in}$  maksimum, hal ini menandakan pada fase *liquid* kecepatan optimum terjadi di sekitar 200 rpm.

Tabel V.1 Pengaruh kecepatan putar terhadap performa perpindahan kalor

| Parameter                      | 100 rpm       |                   | 150 rpm       |                   | 200 rpm       |                   | 250 rpm       |                   |
|--------------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
|                                | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> |
| $Q_{out}$ (Watt)               | -188.472      | -25.94329         | -259.881      | -100.592          | -292.708      | -139.8019         | -285.565      | -172.9512         |
| $U$<br>(Watt/m <sup>2</sup> K) | 869.2784      | -                 | 2268.862      | -                 | 3734.344      | -                 | 3736.665      | -                 |

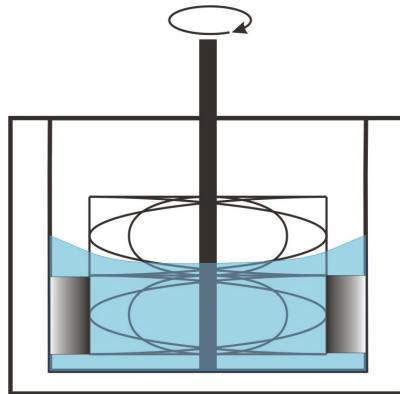
Perhitungan pada tabel V.1 untuk fase *liquid* dievaluasi mulai dari awal pengukuran (menit ke-0) sampai waktu dimana temperatur larutan mendekati temperatur titik beku untuk fraksi massa 7% yaitu  $-2.25^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan untuk fase *liquid-ice* dievaluasi mulai dari waktu dimana temperatur larutan rata-rata mendekati  $-2.75^{\circ}\text{C}$  sampai menit akhir yaitu menit ke-105, hal ini bertujuan untuk mengkompensasi adanya penampakan perbedaan titik beku larutan yang berbeda-beda seperti yang telah dipaparkan sebelumnya. Tampak bahwa untuk semua fase, semakin cepat putaran *auger* maka akan semakin besar laju perpindahan kalor dan koefisien perpindahan kalornya namun tampaknya trendnya tidak linier. Dari tabel diatas, diketahui bahwa laju perpindahan kalor hasil perhitungan untuk fase *liquid-ice* berada jauh dibawah fase *liquid*, hal ini diduga karena presisi yang kurang pada alat pengukur temperatur dan selang waktu pengambilan data temperatur yang terlalu besar. Seperti yang telah disinggung sebelumnya, proses pembekuan pada larutan biner tidak berlangsung pada satu titik temperatur melainkan pada suatu daerah temperatur yang kecil namun memiliki nilai energi /

enthalpi yang tinggi sehingga untuk perbedaan enthalpi yang sama, perbedaan temperatur pada fase *liquid-ice* akan jauh lebih kecil dibandingkan perbedaan temperatur pada fase *liquid*.



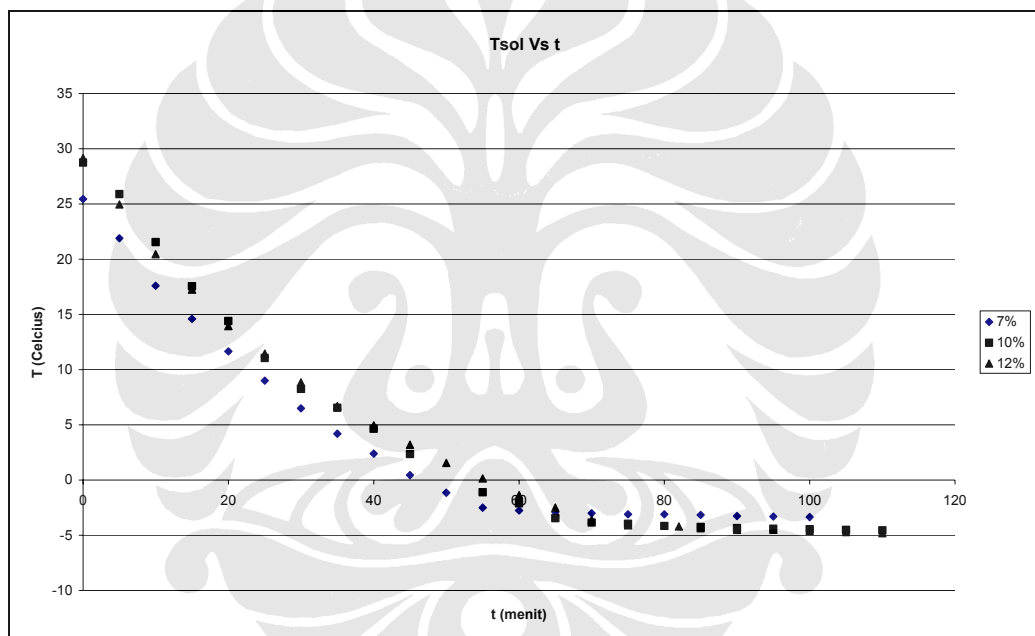
Gambar 5.5. Foto adhesi es pada ISG untuk konsentrasi 7%, (a) pada kecepatan 100 rpm, (b) pada kecepatan 200 rpm, (c) pada kecepatan 250 rpm

Gambar 5.5 diatas merupakan foto pada dinding *ice slurry generator* setelah terbentuknya *ice slurry*. Untuk melihat apakah *scraper* mampu menyapu lapisan es dari dinding, *ice slurry* yang terbentuk diambil sebanyak  $\pm 5$  liter sehingga ketinggian *ice slurry* berkurang dan terlihat permukaan yang dilewati *scraper*. Tampak bahwa *scraper* telah mampu menyapu lapisan *mushy* pada dinding perpindahan kalor bahkan untuk kecepatan 100 rpm. Dari gambar 5.5 tampak pula adanya lapisan es pada daerah yang tidak dilalui *scraper* (bagian atas), ketinggian lapisan es yang terbentuk akan semakin tinggi seiring dengan meningkatnya putaran *auger*. Hal ini dikarenakan permukaan cairan dalam bejana terbuka yang mengalami rotasi akan membentuk pola parabola dengan ketinggian maksimum berada pada daerah dekat dinding, sebagaimana yang diilustrasikan pada gambar 5.6 dibawah ini.



Gambar 5.6. Efek rotasi terhadap profil permukaan larutan

### 5.3.2 Pengaruh Konsentrasi Terhadap Laju Perpindahan Kalor



Gambar 5.7. Kurva temperatur untuk kecepatan 200 rpm

Sebagaimana yang telah disinggung pada bab sebelumnya, berbagai sifat fisik larutan biner seperti massa jenis, kapasitas panas, konduktivitas *thermal*, dan viskositas tergantung terhadap konsentrasi dan temperatur. Hal ini sedikit banyak akan berpengaruh terhadap perpindahan panas yang terjadi. Pada gambar 5.6 dapat dilihat kurva penurunan temperatur larutan untuk fraksi massa awal 7%, 10% dan 12% pada kecepatan putar *auger* 200 rpm. Secara umum pada fase *liquid*, semakin tinggi fraksi massa awal larutan biner maka akan semakin landai kurva penurunan temperatur yang juga berarti laju perpindahan kalor semakin

rendah. Hal ini disebabkan massa jenis ethylene glycol lebih besar dibandingkan massa jenis air, peningkatan pada fraksi massa awal larutan akan meningkatkan pula massa jenis larutan sehingga untuk menurunkan temperatur sebesar 1°C pada larutan biner dengan fraksi massa lebih tinggi diperlukan pengambilan energi kalor yang lebih tinggi pula. Selain berpengaruh terhadap sifat fisik larutan, peningkatan fraksi massa juga akan menurunkan titik beku larutan biner sehingga temperatur seimbang pada fase *liquid-ice* akan lebih rendah untuk larutan biner yang memiliki fraksi massa awal lebih besar.

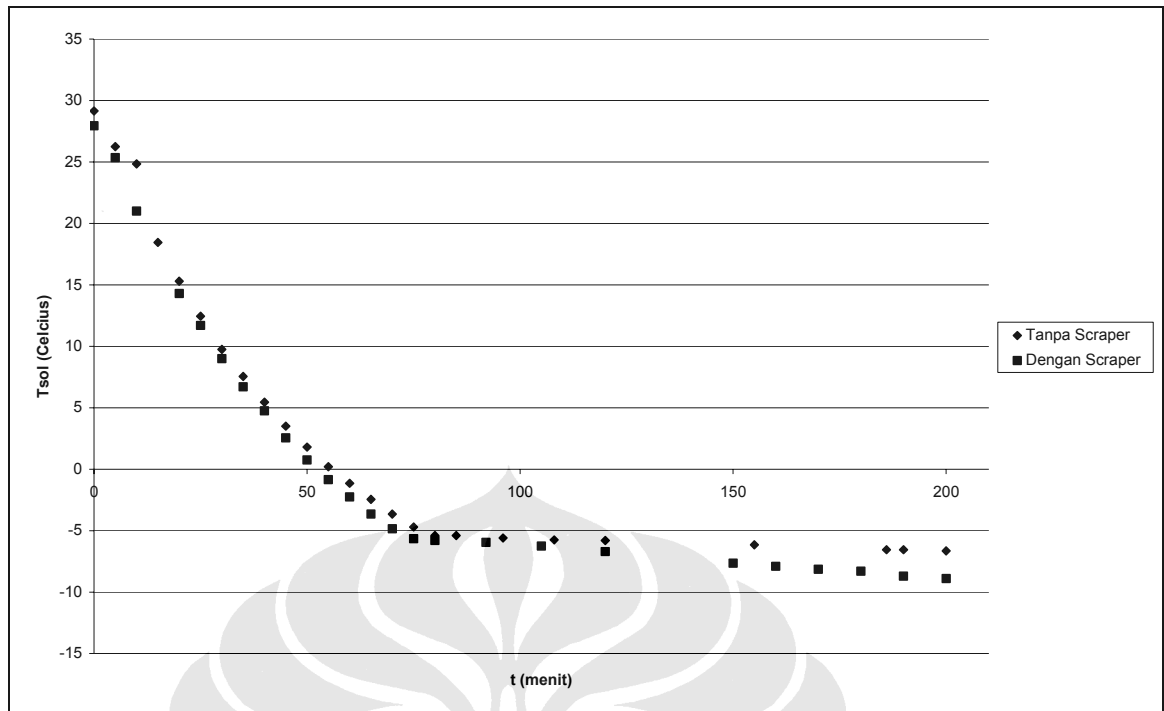
Tabel V.2. Pengaruh konsentrasi terhadap performa perpindahan kalor

| Parameter                 | 7%            |                   | 10%           |                   | 12%           |                   |
|---------------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
|                           | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> | <i>liquid</i> | <i>liquid-ice</i> |
| Q <sub>out</sub> (Watt)   | -292.708      | -139.8019         | -255.39       | -188.0665         | -223.759      | -152.451          |
| U (Watt/m <sup>2</sup> K) | 3734.344      | -                 | 2528.526      | -                 | 1290.04       | -                 |

Sebagaimana yang tercantum pada tabel V.2, laju perpindahan kalor dan koefisien perpindahan kalor untuk fase *liquid* menurun seiring dengan kenaikan konsentrasi seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Namun pada fase *liquid-ice*, laju perpindahan kalor hasil penghitungan tidak jelas hubungannya dengan kenaikan fraksi massa awal larutan. Hal ini disebabkan presisi alat pengukur temperatur yang kurang tinggi dan selang waktu pengambilan data yang terlalu besar, sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya..

### 5.3.3 Pengaruh *Scraper* Terhadap Performa *Ice slurry Generator*

Untuk tujuan mengetahui seberapa besar pengaruh *scraper* hasil rancangan terhadap laju perpindahan kalor, dilakukan dua pengujian yaitu pembentukan *ice slurry* tanpa *scraper* dan dengan *scraper*. Pengujian ini dilakukan dengan fraksi massa awal larutan sebesar 15% dengan awal titik beku pada temperatur -5.46°C , temperatur awal larutan ± 28°C, dan kecepatan putar *auger* 200 rpm selama 200 menit. Profil kurva temperatur larutan untuk kedua mode pengujian dapat dilihat pada gambar 5.8 dibawah.



Gambar 5.8. Kurva temperatur larutan rata-rata terhadap waktu untuk *auger* tanpa *scraper* dan yang telah dilengkapi *scraper*

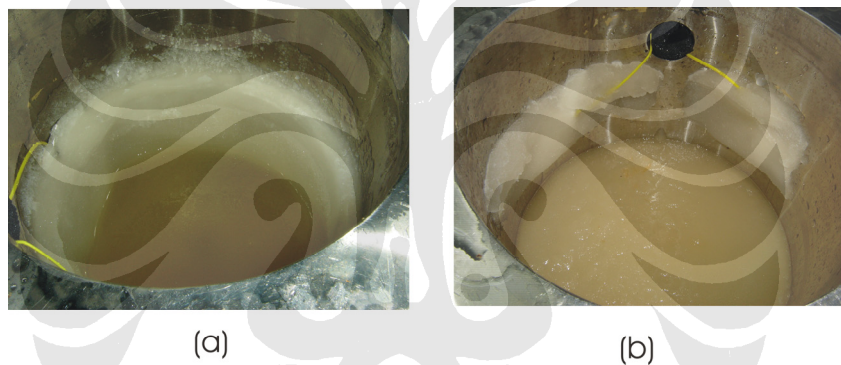
Pada gambar 5.8 terlihat kurva temperatur larutan hasil pengukuran untuk kedua mode pengujian, untuk daerah *liquid* pencatatan temperatur dilakukan dalam selang waktu 5 menit sedangkan pada daerah *liquid-ice* selang waktu pencatatan temperatur bervariasi mulai dari 10 sampai 30 menit dikarenakan setelah larutan berada pada daerah *liquid-ice* perubahan temperatur terhadap waktu sangat kecil. Dari grafik diatas dapat diketahui ketika larutan masih berada pada fase *liquid* tampak bahwa profil laju perubahan temperatur untuk kedua mode pengujian tidak ada perbedaan yang signifikan, namun setelah larutan memasuki daerah *liquid-ice* tampak jelas bahwa pada pengujian *auger* yang telah dilengkapi *scraper* dapat mencapai temperatur yang lebih rendah dibandingkan *auger* tanpa *scraper* dalam selang waktu yang sama. Hal ini berarti fungsi *scraper* sebagai penyapu lapisan *mushy* pada dinding dapat bekerja cukup efektif sehingga berhasil meningkatkan laju perpindahan kalor pada pembentukan *ice slurry*. Untuk memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai seberapa besar pengaruh *scraper* ini terhadap performa, dilakukan penghitungan laju perpindahan kalor untuk kedua mode pengujian ini, nilainya terlihat pada tabel V.3 dibawah ini.



Tabel V.3. Pengaruh *scraper* terhadap laju perpindahan kalor

| Parameter               | Tanpa <i>scraper</i> |                   | Dengan <i>scraper</i> |                   |
|-------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
|                         | <i>liquid</i>        | <i>liquid ice</i> | <i>liquid</i>         | <i>liquid ice</i> |
| Q <sub>out</sub> (Watt) | -241.63              | -48.58            | -251.39               | -93.78            |

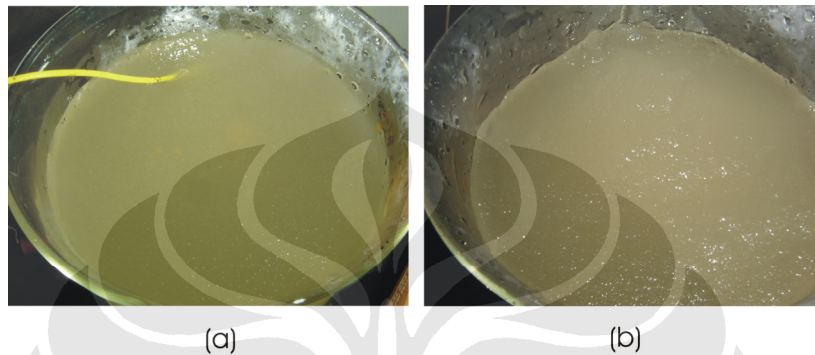
Hasil penghitungan laju perpindahan kalor rata-rata untuk kedua fase menunjukkan hasil yang sama dengan analisa berdasarkan profil temperatur larutan rata-rata diatas. Dengan menggunakan *scraper*, terhitung terjadi peningkatan perpindahan kalor rata-rata sebesar 4% pada fase *liquid* dan 93% pada fase *liquid-ice*. Peningkatan laju perpindahan kalor rata-rata yang tajam pada mode pengujian *auger* yang dilengkapi *scraper* menunjukkan bahwa *scraper* mampu menyapu lapisan *mushy* pada dinding perpindahan kalor sehingga resistansi tambahan akibat adanya lapisan es ini dapat diminimalkan.



Gambar 5.9. Foto adhesi es pada ISG, (a) tanpa *scraper*, (b) dengan *scraper*

Dari gambar 5.9a diatas tampak jelas tebalnya lapisan es yang terbentuk apabila *auger* tidak dilengkapi *scraper*, lapisan es ini menutupi seluruh permukaan dinding perpindahan kalor dan karena koefisien konduksi *thermal* es relatif rendah maka ia menciptakan hambatan *thermal* tambahan sehingga temperatur *ice slurry* tidak terlalu rendah. Sebaliknya pada mode pengujian *auger* yang dilengkapi *scraper*, tidak tampak adanya lapisan es pada permukaan dinding perpindahan kalor yang dilewati *scraper* (lihat gambar 5.9b), lapisan es hanya berada daerah pada bagian atas dinding yang merupakan daerah yang tidak dilewati *scraper*. Sebagai akibatnya ialah koefisien perpindahan kalor dapat mencapai nilai yang lebih tinggi. Selain itu teramati pula kepadatan es pada *ice slurry* hasil mode pengujian menggunakan *scraper* lebih padat dibandingkan tidak

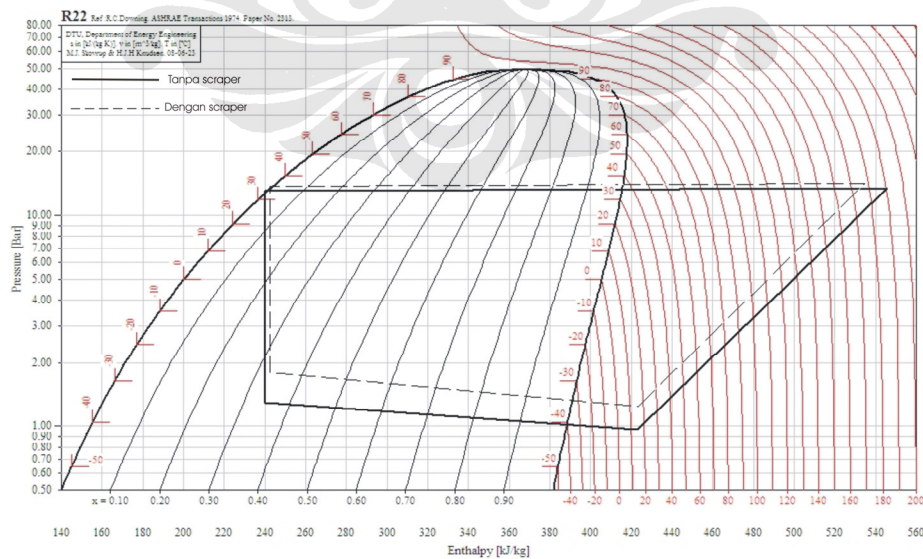
menggunakan *scraper* (lihat gambar 5.10), hal ini dikarenakan pada mode pengujian tanpa *scraper* sebagian besar es yang terbentuk terkonsentrasi disekitar dinding perpindahan kalor sehingga kepadatan es pada *ice slurry* kecil. Kepadatan es yang besar menunjukkan kapasitas panas *ice slurry* yang besar namun apabila terlalu padat maka viskositasnya juga bertambah dan *ice slurry* bukan lagi fluida Newtonian, sehingga untuk mengalirkannya diperlukan daya pompa yang relatif lebih besar.



Gambar 5.10. Foto kepadatan es pada mode pengujian, (a) tanpa *scraper*, (b) dengan *scraper*

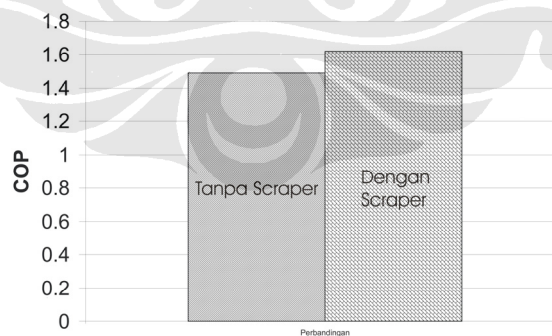
### 5.3.4 Pengaruh *Scraper* Terhadap COP Sistem Refrigerasi ISG

Pada gambar dibawah dapat dilihat plot diagram p-h pada sistem refrigerasi ISG untuk *auger* yang telah dilengkapi *scraper* dan tidak dengan *scraper*.



Gambar 5.11. Plot diagram p-h untuk sistem refrigerasi ISG dengan *scraper* dan tanpa *scraper*

Pengukuran tekanan dan temperatur untuk membuat diagram diatas dilakukan setelah sistem berjalan 200 menit, diasumsikan pada waktu ini sistem refrigerasi telah berada pada keadaan steady untuk kedua mode pengujian. Temperatur evaporasi pada sistem refrigerasi ISG yang *augernya* tanpa *scraper* terlihat lebih rendah dibandingkan sistem ISG dengan *scraper*, hal ini berhubungan dengan besarnya perpindahan kalor yang terjadi pada ISG. Sebagaimana yang telah diuraikan sebelumnya, ISG yang *augernya* tanpa *scraper* memiliki laju perpindahan kalor rata-rata relatif lebih rendah dibandingkan terhadap *auger* dengan *scraper* yang juga berarti laju penurunan superheating yang terjadi cenderung lebih besar untuk ISG tanpa *scraper*. Superheating yang cenderung menurun ini terdeteksi oleh bulb TXV dan membuat laju penurunan tekanan refrigerant pada bulb juga relatif lebih cepat dan karena TXV memiliki fungsi untuk mempertahankan superheating pada nilai tertentu dengan cara mengatur besar kecil bukaan katup maka laju penutupan katup expansion valve lebih cepat untuk ISG tanpa *scraper* dibandingkan ISG dengan *scraper*. Keadaan ini akan berlangsung sampai sistem setimbang yang ditandai dengan perubahan pada superheating yang rendah, pada keadaan setimbang ini temperatur evaporasi pada ISG tanpa *scraper* akan lebih rendah dibandingkan ISG dengan *scraper*.



Gambar 5.12. Perbandingan COP

Temperatur evaporasi yang rendah cenderung menurunkan nilai COP sebuah sistem refrigerasi disebabkan efisiensi isentropis compressor yang cenderung menurun seiring menurunnya tekanan/temperatur evaporasi. Sebagaimana yang terlihat pada gambar 5.12, pada sistem refrigerasi ISG yang

*augernya* dilengkapi *scraper* memiliki nilai COP 1.62 sedangkan untuk sistem ISG yang *augernya* tanpa *scraper* memiliki COP 1.49.

#### 5.4 ANALISIS KESALAHAN

Selama melakukan penelitian ini, penulis menyadari banyaknya kesalahan yang telah dilakukan. Namun dilihat dari besar kecilnya skala kesalahan yang dapat diakibatkan akibat penerapan metode atau alat tersebut, yang tergolong relatif besar ialah :

- Penggunaan temperatur sebagai dasar perhitungan laju perpindahan kalor dan alat ukur yang kurang presisi.

Sebagaimana yang telah diuraikan pada sub-bab sebelumnya bahwa terdapat perbedaan yang sangat besar antara hasil penghitungan laju perpindahan kalor pada fase *liquid* dengan fase *liquid-ice*. Hal ini disebabkan perubahan nilai enthalpi terhadap temperatur pada fase *liquid ice* jauh lebih besar dibandingkan fase *liquid* sehingga untuk mendapatkan nilai enthalpi yang tepat pada fase *liquid-ice* diperlukan alat ukur temperatur dengan presisi tinggi atau menggunakan kalorimeter. Dengan menggunakan kalorimeter, perlu diambil beberapa sampel dari *ice slurry* yang terbentuk untuk dimasukkan dalam bejana yang terisolasi dan diberikan sejumlah kalor sampai temperaturnya 0°C, jumlah kalor yang diberikan dibagi massa sampel merupakan enthalpi akhir *ice slurry*.

- Jumlah dan letak *termocouple*

Pada penelitian ini, penulis menggunakan 4 buah *termocouple* (2 pada larutan dan 2 pada dinding *heat transfer*). Dilihat dari perbandingan jumlah *termocouple* dan ukuran ISG, tampaknya masih terlalu kecil karena terdapat kemungkinan variasi temperatur yang terjadi pada larutan dan dinding *heat transfer* cukup besar.