



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI PENGARUH ALIRAN BRINE TERHADAP LAJU  
PEMBEKUAN AIR PADA MINI ICE PLANT**

**SKRIPSI**

**DEDDY RIZKY SAHAR  
0606073051**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI PENGARUH ALIRAN BRINE TERHADAP LAJU  
PEMBEKUAN AIR PADA MINI ICE PLANT**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DEDDY RIZKY SAHAR  
0606073051**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Deddy Rizky Sahar**

**NPM : 0606073051**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 9-7-2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Deddy Rizky Sahar  
NPM : 0606073051  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Simulasi Pengaruh Aliran *Brine* Terhadap Laju Pembekuan Air pada Mini Ice Plant

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. M. Idrus Alhamid (.....)

Pembimbing : Dr.-Ing, Ir. Nasruddin, M.Eng. (.....)

Penguji : M. Taufik, Dipl.-Ing., M.M. (.....)

Ditetapkan di :  
Tanggal :

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT., karena atas berkat dan rahmat- Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. **Dr. Ir. M. Idrus Alhamid** dan **Dr.-Ing, Ir Nasruddin, M.Eng**, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.

Akhir kata, saya berharap semoga Allah SWT. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 20 Juni 2010

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Deddy Rizky Sahar

NPM : 0606073051

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**SIMULASI PENGARUH ALIRAN BRINE TERHADAP LAJU PEMBEKUAN  
AIR PADA MINI ICE PLANT**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 20 Juni 2010

Yang menyatakan



(Deddy Rizky Sahar)

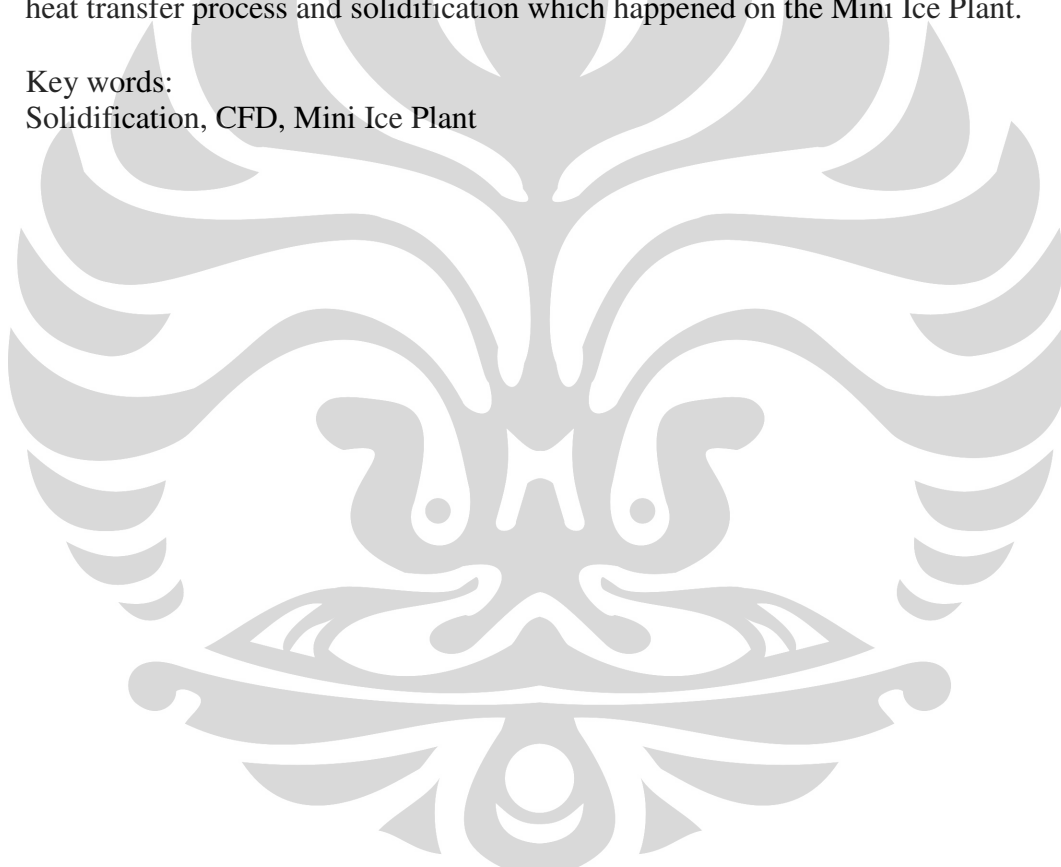
v

## ABSTRACT

Name : Deddy Rizky Sahar  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Simulation the Effect of Brine Flow with the Rate of Ice Solidification in Mini Ice Plant

Indonesia as an archipelago country with those majoring people activity is fishery. Mini Ice Plant will help economy activity in coastal area which level of application technology as well as economy level is low. Mini Ice Plant with simple form low power will be reduced cost to produce ice which used to maintain quality of fish catches. Simulation process of CFD is done as one of effort to make maximization of heat transfer process and solidification which happened on the Mini Ice Plant.

Key words:  
Solidification, CFD, Mini Ice Plant



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
LAMPIRAN.....	xii
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Pembatasan Masalah .....	2
1.3. Tujuan Penelitiann.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Ruang Lingkup Penelitian .....	2
1.6 Asumsi-asumsi yang Digunakan .....	2
1.7 Metodologi Penelitian .....	3
1.8 Sistematika Penulisan.....	3
<b>2. DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Kalor .....	5
2.1.1 Kalor Sensibel ( <i>Sensible Heat</i> ) .....	5
2.1.2 Kalor Laten ( <i>Latent Heat</i> ) .....	6
2.2 Perpindahan Kalor .....	7
2.2.1 Konduksi .....	7
2.2.2 Konveksi .....	7
2.3 Refrigerasi .....	8
2.4 Refrigeran .....	11
2.5 Solidification .....	12
2.6 Computational Fluid Dynamic (CFD).....	13
2.6.1 Pre-processor .....	14
2.6.2 Solver .....	14
2.6.3 Post-processor .....	14
2.6.4 Merencanakan Analisa CFD .....	15
2.7 Komponen-komponen pada Mini Ice Plant.....	16
2.7.1 Peti Kemas ( <i>Container</i> ) .....	17
2.7.2 Pompa Submersibel .....	18
2.7.3 Ice Bank .....	19
2.7.4 Ice Can .....	19



2.7.5 Rak Cetakan Es .....	20
2.7.6 Hoist .....	21
2.7.7 Rel Hoist .....	22
2.7.8 Water Reservoir .....	22
2.7.9 Penutup Bak.....	22
2.7.10 Dip Tank .....	23
2.7.11 Tilting .....	23
2.7.12 Mesin Refrigerasi .....	24
<b>3. PERANCANGAN GEOMETRI DAN PENENTUAN KONDISI BATAS</b>	
<b>PADA SIMULASI .....</b>	<b>30</b>
3.1 Pembuatan Geometri .....	31
3.2 Pendefinisian Material.....	33
3.2.1 Galvanized Steel .....	38
3.2.2 Air (H <sub>2</sub> O) .....	38
3.2.3 <i>Brine</i> (Larutan NaCl) .....	40
3.3 Kondisi Batas.....	42
3.3.1 Dinding Bak .....	43
3.3.2 Can dan Can Shadow .....	49
3.3.3 Inlet .....	49
3.3.4 Outlet .....	52
3.4 Solver.....	52
3.5 Limitasi.....	56
3.6 Iterasi .....	57
<b>4. HASIL SIMULASI DAN ANALISA .....</b>	<b>58</b>
4.1 Hasil Simulasi Pembekuan .....	58
4.1.1 Hasil Simulasi Pembekuan pada Sumbu y= 460 mm .....	58
4.1.2 Hasil Simulasi Pembekuan Tampak Samping .....	61
4.2 Hasil Simulasi Distribusi Temperatur .....	65
4.3 Distribusi Aliran <i>Brine</i> .....	67
<b>5. PENUTUP .....</b>	<b>69</b>
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran .....	69
<b>DAFTAR KUTIPAN.....</b>	<b>70</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>71</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan kalor karena adanya perbedaan temperatur .....	5
Gambar 2.2 Energi yang dibutuhkan untuk merubah temperatur dan fase air .....	6
Gambar 2.3 Gambaran skematis siklus refrigerasi kompresi uap .....	9
Gambar 2.4 Gambaran skematis siklus refrigerasi termasuk perubahan tekanannya	10
Gambar 2.5 Kurva <i>Eutectic Sodium Klorida</i> di dalam air .....	12
Gambar 2.6 Kurva pendinginan dan solidifikasi .....	13
Gambar 2.7 Diagram alir prosedur simulasi .....	16
Gambar 2.8 Peti kemas .....	17
Gambar 2.9 Insulasi pada dinding peti kemas .....	18
Gambar 2.10 <i>Ice Bank</i> .....	19
Gambar 2.11 <i>Ice Can</i> .....	20
Gambar 2.12 Rak cetakan es .....	21
Gambar 2.13 <i>Hoist</i> .....	21
Gambar 2.14 <i>Rel Hoist</i> .....	22
Gambar 2.15 <i>Diptank</i> .....	23
Gambar 2.16 <i>Tilting</i> .....	24
Gambar 2.17 Kompresor <i>Tecumseh</i> 2,5 pk dan 1,5 pk .....	25
Gambar 2.18 Kondenser .....	26
Gambar 2.19 TX-Valves .....	26
Gambar 2.20 Evaporator .....	27
Gambar 2.21 Check Valves .....	28
Gambar 2.22 Filter Dryer .....	28
Gambar 2.23 Oil Separator .....	29
Gambar 2.24 Sight Glass .....	29
Gambar 2.25 Pressure Control .....	29
Gambar 3.1 Skema tampak atas Mini Ice Plant dan arus aliran <i>brine</i> .....	30
Gambar 3.2 Skema isometri pada Mini Ice Plant .....	32
Gambar 3.2 Skema isometri pada Mini Ice Plant .....	33
Gambar 3.4 Hasil pembuatan <i>Mesh</i> .....	34
Gambar 3.5 Hasil pemeriksaan <i>Mesh</i> .....	35
Gambar 3.6 Panel material .....	36
Gambar 3.7 Panel <i>database</i> material .....	37
Gambar 3.8 Pendefinisian material <i>Galvanized Steel</i> .....	38
Gambar 3.9 Pendefinisian material air ( $H_2O$ ) .....	39
Gambar 3.10 Pendefinisian material <i>brine</i> .....	41
Gambar 3.11 Pendefinisian Kondisi Batas .....	43
Gambar 3.12 Pendefinisian kondisi batas atas bak .....	45
Gambar 3.13 Pendefinisian kondisi batas atas <i>can</i> 1 .....	45
Gambar 3.14 Pendefinisian kondisi batas atas <i>can</i> 2 .....	46
Gambar 3.15 Pendefinisian kondisi batas bawah .....	46
Gambar 3.16 Pendefinisian kondisi batas belakang .....	47

Gambar 3.17 Pendefinisian kondisi batas depan .....	47
Gambar 3.18 Pendefinisian kondisi batas samping kiri & kanan .....	48
Gambar 3.19 Pendefinisian kondisi batas <i>can</i> .....	49
Gambar 3.20 Pendefinisian kondisi batas <i>can shadow</i> .....	49
Gambar 3.21 Pendefinisian kondisi batas <i>inlet</i> .....	50
Gambar 3.22 Pendefinisian kondisi batas <i>Outlet</i> .....	52
Gambar 3.23 Pendefinisian <i>Solver</i> .....	53
Gambar 3.24 Pendefinisian model <i>viskos</i> .....	55
Gambar 3.25 Pendefinisian model pembekuan dan peleburan .....	56
Gambar 3.26 Pendefinisian persamaan energi .....	56
Gambar 3.27 Pengaturan limitasi .....	57
Gambar 4.1 Skema tampak atas <i>Mini Ice Plant</i> .....	58
Gambar 4.2 Hasil simulasi solidifikasi $t = 4$ jam .....	59
Gambar 4.3 Hasil simulasi solidifikasi $t = 16$ jam .....	60
Gambar 4.4 Hasil simulasi solidifikasi $t = 32$ jam .....	61
Gambar 4.5 Hasil simulasi solidifikasi $t = 4$ jam pada baris ketiga .....	62
Gambar 4.6 Hasil simulasi solidifikasi $t = 4$ jam pada baris kedua .....	62
Gambar 4.7 Hasil simulasi solidifikasi $t = 4$ jam pada baris pertama .....	62
Gambar 4.8 Hasil simulasi solidifikasi $t = 16$ jam pada baris ketiga .....	63
Gambar 4.9 Hasil simulasi solidifikasi $t = 16$ jam pada baris kedua .....	63
Gambar 4.10 Hasil simulasi solidifikasi $t = 16$ jam pada baris pertama .....	63
Gambar 4.11 Hasil simulasi solidifikasi $t = 32$ jam pada baris ketiga .....	64
Gambar 4.12 Hasil simulasi solidifikasi $t = 32$ jam pada baris kedua .....	64
Gambar 4.13 Hasil simulasi solidifikasi $t = 32$ jam pada baris pertama .....	65
Gambar 4.14 Distribusi temperature pada $t = 4$ jam .....	66
Gambar 4.15 Distribusi temperature pada $t = 32$ jam .....	66
Gambar 4.16 Distribusi aliran <i>brine</i> .....	67

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1.LATAR BELAKANG**

Potensi produksi perikanan Indonesia mencapai 65 juta ton per tahun. Dari potensi tersebut hingga saat ini dimanfaatkan sebesar 9 juta ton. Namun, potensi tersebut sebagian besar berada di perikanan budidaya yang mencapai 57,7 juta ton per tahun dan baru dimanfaatkan 2,08%. Sedangkan potensi perikanan tangkap (laut dan perairan umum) hanya sebesar 7,3 juta ton per tahun dan telah dimanfaatkan sebesar 65,75%

Jumlah ekspor perikanan di Indonesia sebesar 577.419 ton ( 12,54% ) dari total produk nasional, yakni 4,6 juta ton. Jumlah ikan yang dipasarkan dalam bentuk segar mencapai 77,6% dan produk es nasional sebesar 2,9 juta ton. 30% dari produksi es tersebut dipakai untuk produk ikan yang diekspor. Oleh karena itu mutu ikan yang dipasarkan dalam negeri masih kurang bagus. Jumlah produksi es nasional yang tidak sebanding dengan jumlah hasil tangkapan ikan dikarenakan kurangnya jumlah industri atau pabrik penghasil es, khususnya di daerah-daerah terpencil di luar pulau Jawa.

Sangat sedikitnya pabrik es di daerah terpencil di luar Jawa disebabkan oleh beberapa faktor, yakni:

- Sarana transportasi ke daerah terpencil yang kurang memadai sehingga menyulitkan distribusi pengadaan peralatan pabrik es.
- Kurangnya tenaga ahli maupun buruh bangunan yang pandai untuk membangun sebuah pabrik es. Sehingga biayanya akan sangat mahal sekali jika tenaga ahli dan buruh semuanya didatangkan dari pulau Jawa.
- Kebutuhan yang besar akan tenaga listrik untuk mengoperasikan pabrik es

Oleh sebab itu perlu dikembangkan suatu pabrik es yang dapat mengakses ke berbagai daerah terutama daerah nelayan terpencil, dengan biaya instalasi yang relative murah dan memiliki kapasitas produksi es dalam jumlah yang relatif besar.

### 1.1. PEMBATASAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas adalah distribusi temperatur dan menentukan seberapa cepat es yang terbentuk di dalam *can*.

### 1.2. TUJUAN PENELITIAN

Mendapatkan aliran *brine* yang optimal sehingga didapatkan laju solidifikasi air di dalam *can* dapat berlangsung cepat dan merata.

### 1.3. MANFAAT PENELITIAN

Tujuan penelitian ini diharapkan dapat mengoptimasi sitem *Mini Ice Plant* ada, sehingga dapat dihasilkan suatu pabrik es mini yang efisien dan dapat membantu nelayan dalam memenuhi kebutuhan es batu guna meningkatkan kualitas hasil tangkapannya.

### 1.4. RUANG LINGKUP PENELITIAN

Batasan-batasan yang dilakukan terhadap penelitian adalah:

1. Pengambilan data dilakukan pada petikemas diambil berdasarkan pada ukuran sebenarnya dan beberapa skripsi sebelumnya yang juga membahas tentang *Mini Ice Plant*.
2. Penelitian membahas bentuk aliran *brine* pada mini ice plant, distribusi suhu yang terbentuk pada aliran *brine*, serta laju solidifikasi pada air yang berada di dalam *can*.

### 1.5. ASUMSI-ASUMSI YANG DIGUNAKAN

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa penyederhanaan-penyederhanaan untuk memudahkan dalam perhitungan, di antaranya adalah:

- Air yang digunakan untuk membuat es balok adalah air murni dengan massa jenis  $996.5 \text{ kg/m}^3$ .

- Temperatur air mula-mula yang digunakan untuk membuat es adalah sebesar  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $300,15\text{ K}$ ).
- Temperatur *brine* mula-mula yang digunakan untuk membuat es adalah  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $270,15\text{ K}$ ).
- Isolasi termal pada dinding kontainer cukup baik sehingga dapat diasumsikan adiabatik.
- Debit pompa adalah  $19\text{ m}^3/h$ .

## 1.6. METODOLOGI PENELITIAN

Pada pelaksanaannya penelitian ini dilakukan dengan metodologi sebagai berikut:

### 1. Studi Literatur

Yakni dengan mengacu pada skripsi sebelumnya yang juga membahas tentang *Mini Ice Plant*.

### 2. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk memperoleh data yang akurat mengenai bentuk geometri dari *Mini Ice Plant* tersebut serta kondisi-kondisi batas sesuai dengan kondisi yang ada.

### 3. Simulasi

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah proses simulasi menggunakan software *FLUENT*.

## 1.7. SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini terdiri dari 6 bagian, yaitu:

### 1. PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup dan batas-batas penelitian, asumsi-asumsi yang digunakan, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

### 2. DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan pengertian secara umum dari perpindahan kalor, penjelasan mengenai sistem refrigerasi, pendinginan sekunder, cara melakukan perhitungan, dan pendesainan dari pabrik es.

### 3. SIMULASI

Bab ini memberikan gambaran tentang simulasi dari desain yang ada.

### 4. PERHITUNGAN DAN ANALISA

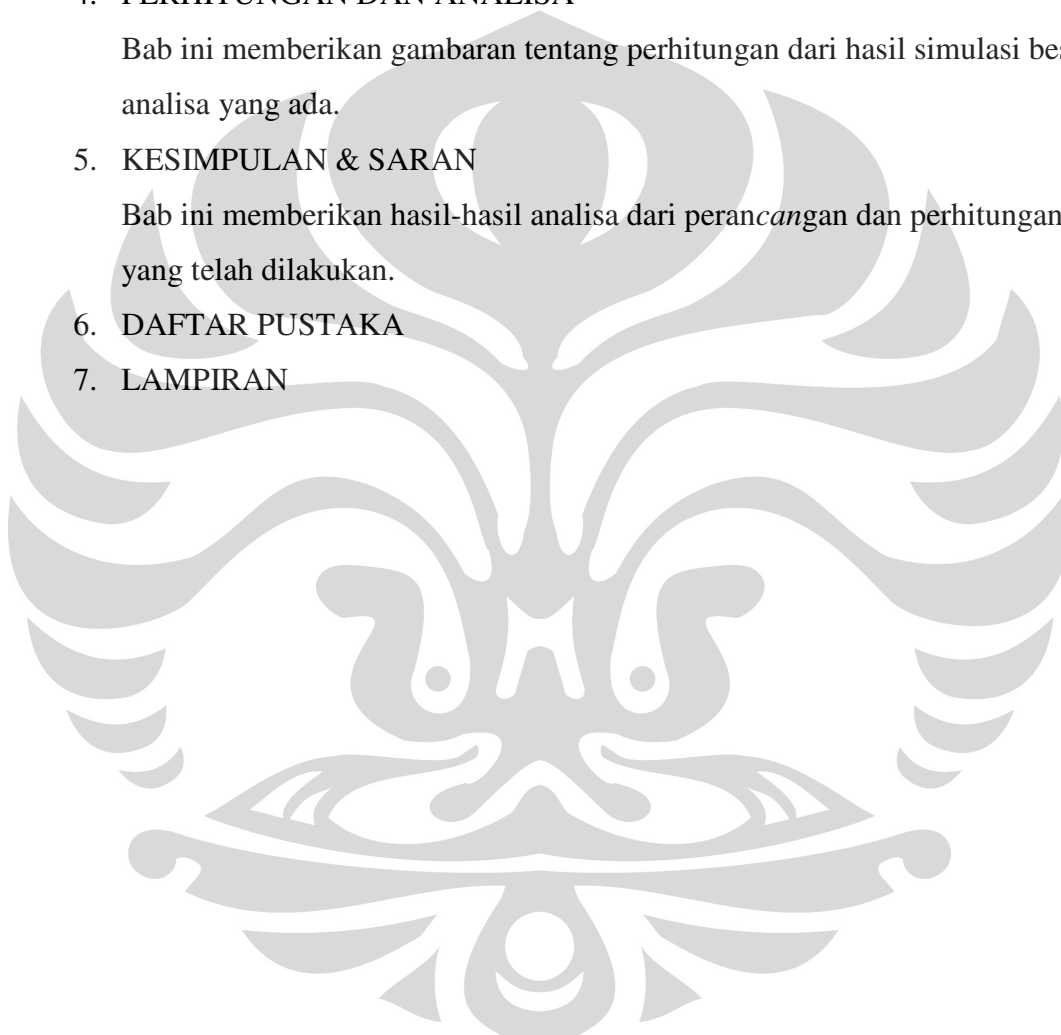
Bab ini memberikan gambaran tentang perhitungan dari hasil simulasi beserta analisa yang ada.

### 5. KESIMPULAN & SARAN

Bab ini memberikan hasil-hasil analisa dari perancangan dan perhitungan yang telah dilakukan.

### 6. DAFTAR PUSTAKA

### 7. LAMPIRAN



## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1. KALOR

Kalor adalah bentuk energi yang berpindah karena perubahan temperatur ( $\Delta t$ ) antara dua zat. Kalor akan berpindah dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah.



Gambar 2.1 Perpindahan kalor karena adanya perbedaan temperatur

Zat yang menerima atau melepaskan kalor akan menyebabkan perubahan temperatur. Jenis kalor ini disebut kalor sensibel (*sensible heat*). Zat yang menerima atau melepaskan kalor juga dapat menyebabkan perubahan fase. Jenis kalor ini disebut kalor laten (*latent heat*).

##### 2.1.1. Kalor Sensibel (*Sensible Heat*)

Kalor yang menyebabkan suatu zat mengalami perubahan temperatur disebut kalor sensibel (*sensible heat*). Zat menerima kalor sensibel akan mengalami peningkatan temperature dan zat yang melepaskan kalor sensibel maka akan mengalami penurunan temperatur.

Persamaan kalor sensibel adalah sebagai berikut:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Di mana:

$Q$  = Energi kalor yang dilepas atau diterima suatu zat (J)

$m$  = massa zat (kg)

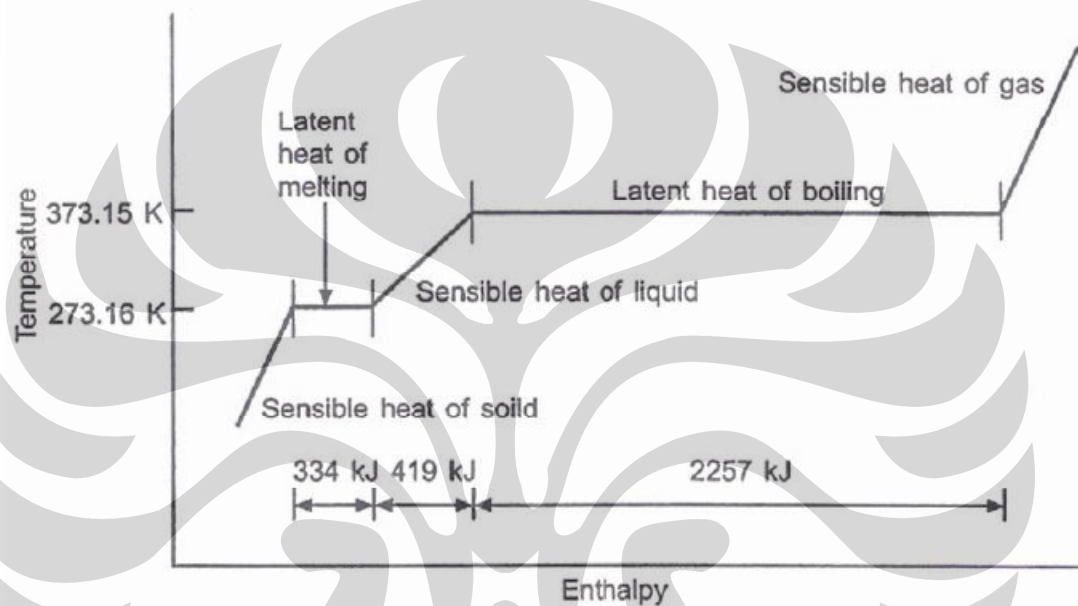
$C_p$  = Kalor jenis zat ( $J/kg \cdot K$ )

$\Delta T$  = Perubahan temperatur yang terjadi (K)



### 2.1.2. Kalor Laten (*Latent Heat*)

Suatu bahan biasanya mengalami perubahan temperatur bila terjadi perpindahan kalor antara bahan dengan lingkungannya. Pada suatu situasi tertentu, aliran kalor ini tidak merubah temperaturnya. Hal ini terjadi bila bahan mengalami perubahan fase. Misalnya padat menjadi cair (mencair), cair menjadi uap (mendidih) dan perubahan struktur kristal (zat padat). Energi yang diperlukan disebut kalor laten.



Gambar 2.2 Energi yang dibutuhkan untuk merubah temperatur dan fase air

Sumber: Trot, A.R., & Welch, T. (3th ed).(2000) Refrigeration and Air-Conditioning Woburn: Butterworth-Heinemann

Kalor yang diperlukan untuk merubah fasa dari bahan yang memiliki massa  $m$  adalah:

$$Q = m \cdot L \quad (2.2)$$

Di mana:

$Q$  = Energi kalor yang dilepas atau diterima suatu zat (J)

$m$  = massa zat (kg)

$L$  = Kalor lebur zat ( $J/kg$ )

## 2.2. PERPINDAHAN KALOR

Bila dua benda atau lebih terjadi kontak termal maka akan terjadi aliran kalor dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal. Proses perpindahan panas ini berlangsung dalam 3 mekanisme, yaitu : konduksi, konveksi dan radiasi.

### 2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah proses di mana kalor mengalir dari daerah yang memiliki temperatur lebih tinggi ke daerah yang bertemperatur lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Bila dilihat dari teori kinetik, perpindahan kalor secara konduksi merupakan pertukaran energi kinetik antar molekul (atom), di mana partikel yang energinya rendah dapat meningkat dengan menumbuk partikel dengan energi yang lebih tinggi.

Pada perpindahan kalor secara konduksi, kalor yang mengalir persatuan waktu sebanding dengan luas penampang  $A$ , sebanding dengan perbedaan temperatur  $\Delta T$  dan berbanding terbalik dengan lebar bidang  $\Delta x$ . Laju perpindahan panas dinyatakan dalam hukum Fourier (Jansen, Ted J., 1993) melalui persamaan:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Dimana:  $q$  = laju perpindahan panas (Watt)

$k$  = konduktivitas termal ( $W/m.K$ )

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

$dT/dx$  = gradien temperatur ( $K/m$ )

Nilai minus (-) pada persamaan di atas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah.

### 2.2.2. Konveksi

Apabila kalor berpindah dengan cara gerakan partikel yang telah dipanaskan dikatakan perpindahan kalor secara konveksi. Bila perpindahannya dikarenakan perbedaan kerapatan disebut konveksi alami (natural convection) dan bila didorong, misal dengan fan atau pompa disebut konveksi paksa (forced convection).

Besarnya konveksi tergantung pada :

- Luas permukaan benda yang bersinggungan dengan fluida (A)
- Perbedaan suhu antara permukaan benda dengan fluida ( $\Delta T$ ).
- Koefisien konveksi (h), yang tergantung pada :
  - Viskositas fluida
  - Kecepatan fluida
  - Perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida
  - Kapasitas panas fluida
  - Rapat massa fluida
  - Bentuk permukaan kontak

Perpindahan panas secara konveksi dinyatakan dalam hukum pendinginan Newton : (Jansen, Ted J., 1993) dengan persamaan:

$$q = hA(T_d - T) \quad (2.4)$$

Di mana: q = laju perpindahan panas (Watt)

h = koefisien konveksi ( $W/m^2 \cdot K$ )

A = luas permukaan ( $m^2$ )

$T_d$  = temperatur dinding (K)

T = temperatur udara (K)

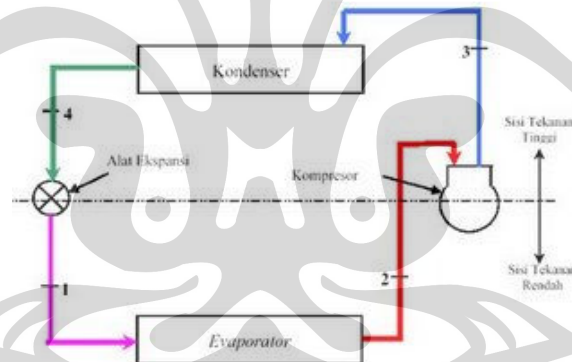
### 2.3. REFRIGERASI

Refrigerasi adalah proses untuk memindahkan panas pada suatu tempat dan memindahkan panas tersebut ke tempat lain. Tujuan utama refrigerasi adalah untuk membuat temperatur yang rendah pada suatu ruangan dan menjaga temperatur di ruangan tersebut agar tetap rendah. Sistem refrigerasi terdiri dari beberapa komponen yang disusun berdasarkan urutan tertentu untuk dapat mengambil kalor dari suatu tempat dan melepaskannya ke tempat lain. Salah satu sistem refrigerasi yang menghasilkan pendinginan adalah siklus kompresi uap.

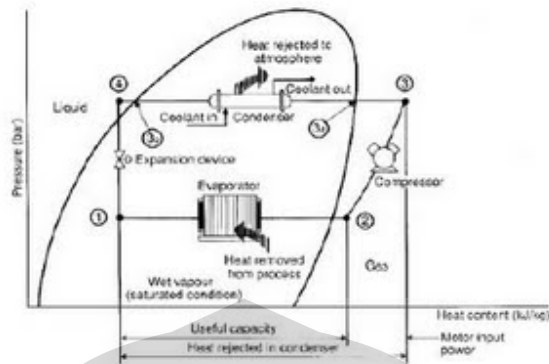
Siklus kompresi uap adalah suatu siklus dimana fluida kerja secara bergantian diuapkan dan diembunkan, dengan suatu proses kompresi uap diantara dua

proses tersebut. Siklus refrigerasi kompresi mengambil keuntungan dari kenyataan bahwa fluida yang bertekanan tinggi pada suhu tertentu cenderung menjadi lebih dingin jika dibiarkan mengembang. Jika perubahan tekanan cukup tinggi, maka gas yang ditekan akan menjadi lebih panas daripada sumber dingin diluar (contoh udara diluar) dan gas yang mengembang akan menjadi lebih dingin daripada suhu dingin yang dikehendaki. Dalam kasus ini, fluida digunakan untuk mendinginkan lingkungan bersuhu rendah dan membuang panas ke lingkungan yang bersuhu tinggi.

Siklus refrigerasi kompresi uap memiliki dua keuntungan. Pertama, sejumlah besar energi panas diperlukan untuk merubah cairan menjadi uap, dan oleh karena itu banyak panas yang dapat dibuang dari ruang yang disejukkan. Kedua, sifat-sifat isothermal penguapan membolehkan pengambilan panas tanpa menaikkan suhu fluida kerja ke suhu berapapun didinginkan. Hal ini berarti bahwa laju perpindahan panas menjadi tinggi, sebab semakin dekat suhu fluida kerja mendekati suhu sekitarnya akan semakin rendah laju perpindahan panasnya.



Gambar 2.2 Gambaran skematis siklus refrigerasi kompresi uap



Gambar 2.3 Gambaran skematis siklus refrigerasi termasuk perubahan tekanannya  
Siklus refrigerasi ditunjukkan pada gambar 2.2 dan 2.3 dan dapat dibagi menjadi tahapan-tahapan berikut :

- **1 – 2.** Cairan refrigeran dalam evaporator menyerap panas dari sekitarnya, biasanya udara, air atau cairan proses lain. Selama proses ini cairan merubah bentuknya dari cair menjadi gas, dan pada keluaran evaporator gas ini diberi pemanasan berlebih/ superheated gas.
- **2 – 3.** Uap yang diberi panas berlebih masuk menuju kompresor dimana tekanannya dinaikkan. Suhu juga akan meningkat, sebab bagian energi yang menuju proses kompresi dipindahkan ke refrigeran.
- **3 – 4.** Superheated gas bertekanan tinggi lewat dari kompresor menuju kondenser. Bagian awal proses refrigerasi menurunkan panas superheated gas sebelum gas ini dikembalikan menjadi bentuk cairan. Refrigerasi untuk proses ini biasanya dicapai dengan menggunakan udara atau air. Penurunan suhu lebih lanjut terjadi pada pekerjaan pipa dan penerima cairan, sehingga cairan refrigeran didinginkan ke tingkat lebih rendah ketika cairan ini menuju alat ekspansi.
- **4 – 1.** Cairan yang sudah didinginkan dan bertekanan tinggi melintas melalui peralatan ekspansi, yang mana akan mengurangi tekanan dan mengendalikan aliran menuju evaporator.

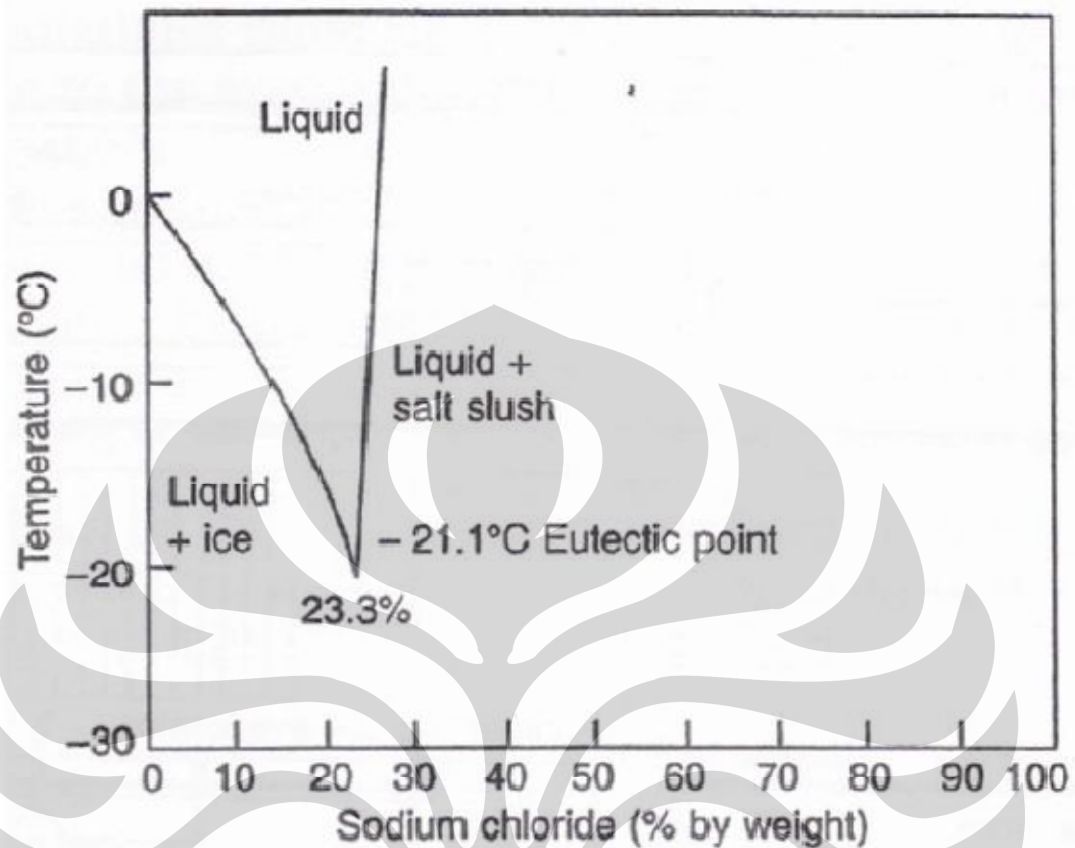
## 2.4. REFRIGERAN

Refrigeran adalah suatu fluida yang digunakan pada proses *heat cycle* di mana dalam prosesnya fluida tersebut akan berubah fase dari fase gas menjadi fase liquid. Refrigeran yang saat ini sering digunakan adalah *Chlorofluorocarbins*. Namun saat ini penggunaannya mulai dibatasi karena penggunaannya menyebabkan penipisan lapisan ozon. Refrigeran lain yang sering digunakan adalah Amonia, Sulfurdioxida, dan Karbondioxida.

Suatu ideal refigeran memiliki propertis termodinamika yang baik seperti tidak bersifat reaktif dan aman. Propertis termodinamika yang diharapkan antara lain memiliki *boiling point* di bawah temperatur yang diinginkan, memiliki nilai kalor penguapan yang tinggi, massa jenis yang ideal ketika dalam fase liquid, massa jenis yang tinggi ketika dalam fase gas, dan memiliki *critical temperature* yang tinggi.

### Refrigeran Sekunder

Refrigeran sekunder adalah fluida yang berfungsi untuk mengambil kalor dari suatu tempat, dimana kalor tersebut akan diambil lagi oleh refrigeran utama. *Brine* atau larutan garam inargonik dalam air merupakan salah satu contoh refrigeran sekunder. *Brine* akan digunakan saat temperatur kerja pada sistem refrigerasi dibawah 0 °C. Sodium Klorida dan Kalsium Klorida merupakan jenis larutan garam yang sering digunakan sebagai *Brine*.



Gambar 2.4 Kurva *Eutectic Sodium Klorida* di dalam air

Sumber: Trot, A.R., & Welch, T. (3th ed).(2000) Refrigeration and Air-Conditioning Woburn: Butterworth-Heinemann

Pada umumnya kadar garam yang digunakan adalah kadar garam di bawah titik *Eutectic*. Hal ini bertujuan untuk mengurangi jumlah garam yang diperlukan dan mengurangi viskositas.

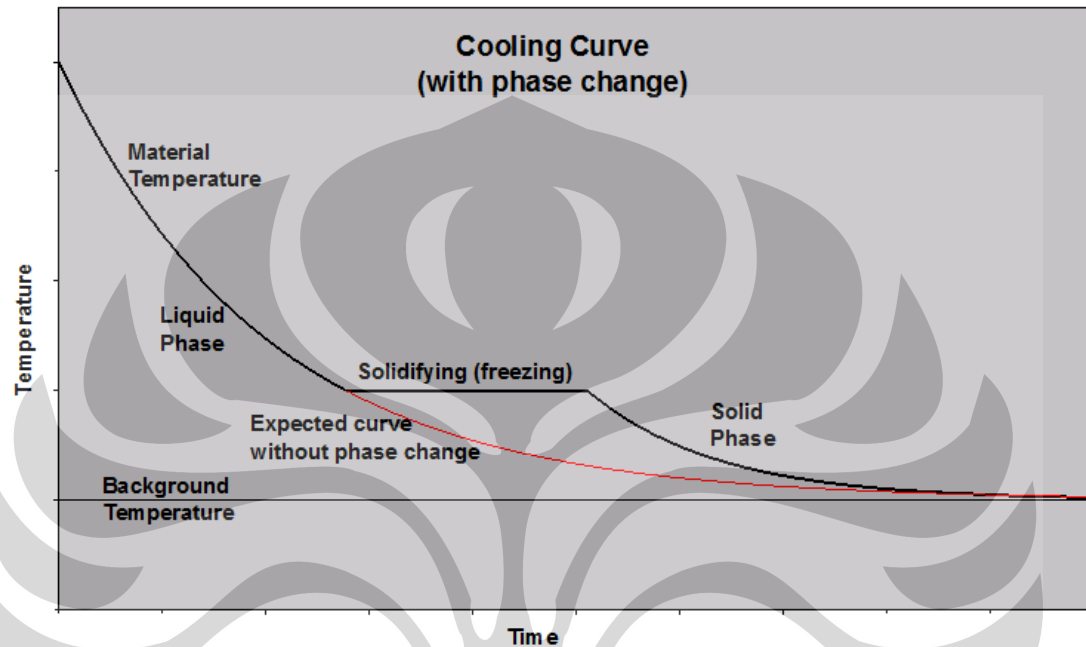
## 2.5. SOLIDIFICATION

Ketika sebuah material berubah temperaturnya, material tersebut juga dapat berubah fasenya. Beberapa contohnya antara lain peleburan, penguapan, pengembunan, dan pembekuan (*solidifying*). Ketika suatu material berubah fase, atom atau molekul pada material tersebut akan berubah susubanya. Hal ini akan menyebabkan suatu perubahan energi yang dapat dilihat sebagai panas laten. Ketika terjadi perubahan fase, susunan atom atau molekul akan merespon perubahan energy

**Universitas Indonesia**

yang terjadi sehingga kapasitas spesifik panas juga akan ikut berubah. Selain itu perubahan susunan atom atau molekul yang terjadi akibat perubahan fase juga akan menyebabkan perubahan massa jenis.

Proses solodifikasi dapat dilihat pada kurva di bawah ini:



Gambar 2.5 Kurva pendinginan dan solidifikasi

Sumber: [www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Solidification/index.html](http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Solidification/index.html)

Energi yang hilang selama proses solidifikasi dinamakan *Latent Heat of Fusion*.

## 2.6. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

Computational Fluid Dynamic atau CFD merupakan sebuah analisa sistem meliputi aliran fluida, transfer kalor, dan fenomena yang berhubungan seperti reaksi kimia yang didefinisikan dari simulasi berdasarkan komputasi. Tekniknya sangat besar kemampuannya dan menjangkau kepada lingkup aplikasi industri dan non-industri .

Computational Fluid Dynamic diatur oleh tiga prinsip yaitu konservasi massa, konservasi momentum, konservasi energi. CFD terdiri dari 3 bagian utama yaitu preprosesor, solver, dan post-prosesor. Tujuan dari CFD adalah untuk menganalisa gejala-gejala fluida dengan menggunakan pendekatan bantuan computer.



### 2.6.1. Pre-processor

Pre-processor terdiri dari input problem aliran pada program CFD untuk kemudahan bagi pengguna dan berikutnya input akan ditransformasikan dalam bentuk yang sesuai dengan pemecahannya. Aktivitas dari bagian pre-processing meliputi:

1. Definisi dari geometri dari daerah yang diperhatikan : domain dari komputasi.
2. Pembentukan grid.
3. Penyeleksian dari fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
4. Definisi dari property fluida.
5. Spesifikasi yang diperlukan pada sel-sel kondisi batas yang bersentuhan dengan domain batas

### 2.6.2. Solver

Ada tiga jenis teknik penyelesaian numerik : finite difference, finite element, dan metode spectral. Pada garis besar metode numeric yang membentuk basis penyelesaian melalui langkah-langkah sebagai berikut:

- Perkiraan dari variabel fluida yang tidak diketahui untuk penyederhanaan fungsi
- Diskritisasi dari penggunaan perkiraan menjadi persamaan aliran yang menentukan dan manipulasi matematik.
- Solusi dari persamaan aljabar

perbedaan dari ketiga jenis tersebut dihubungkan dengan cara variabel aliran diperkirakan dan proses diskritisasi.

### 2.6.3. Post-processor

Sejumlah muatan besar dari pengembangan kerja sudah diambil alih pada daerah post processing . sekarang hasilnya sudah dapat diperlihatkan secara grafik dan diperlengkapi dengan alat visualisasi , seperti :

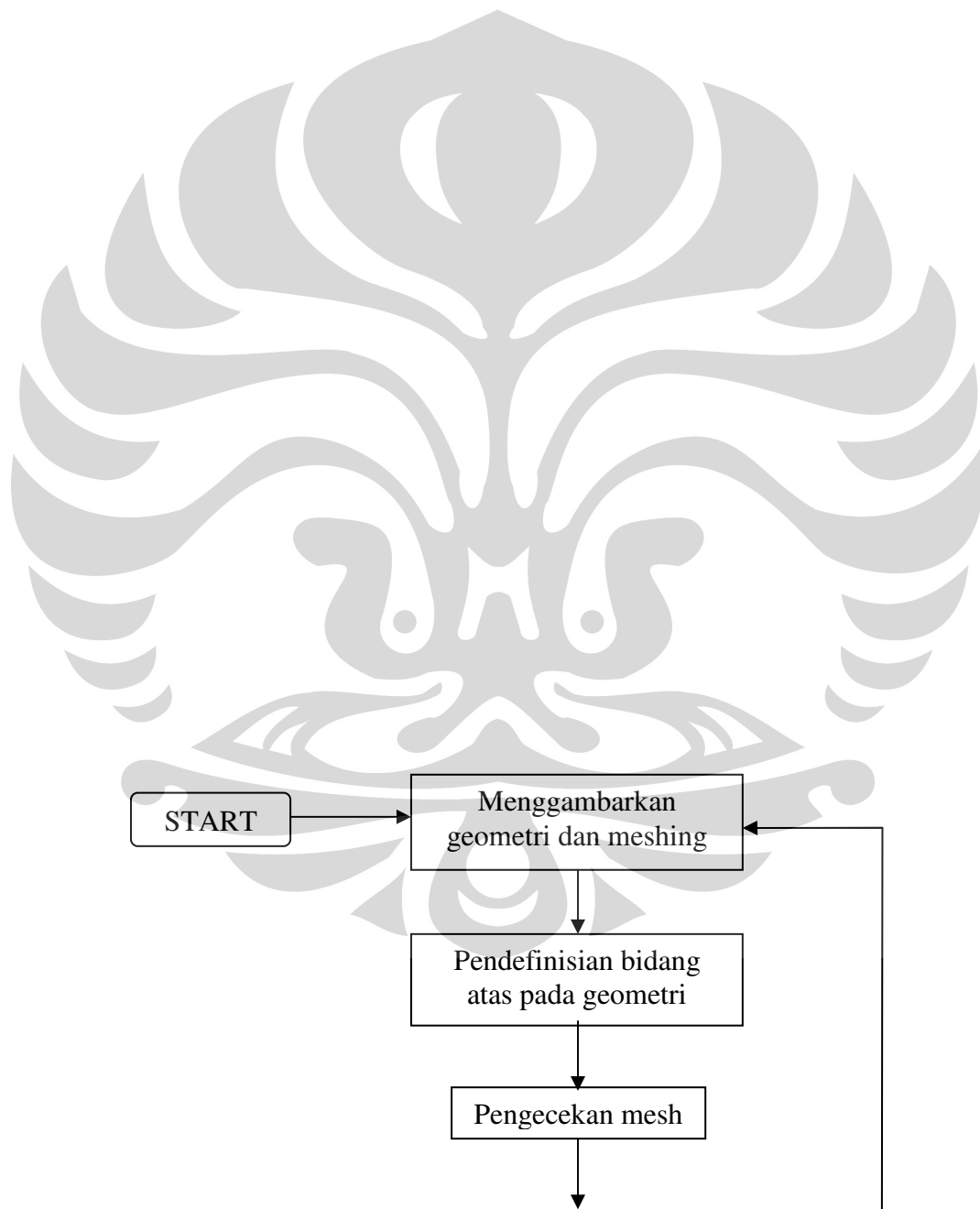
1. Geometri domain dan tampilan grid.
2. Plot vector
3. Garis dan plot kontur

4. 2D dan 3D plot permukaan
5. Jejak partikel
6. Manipulasi penglihatan
7. Keluaran warna

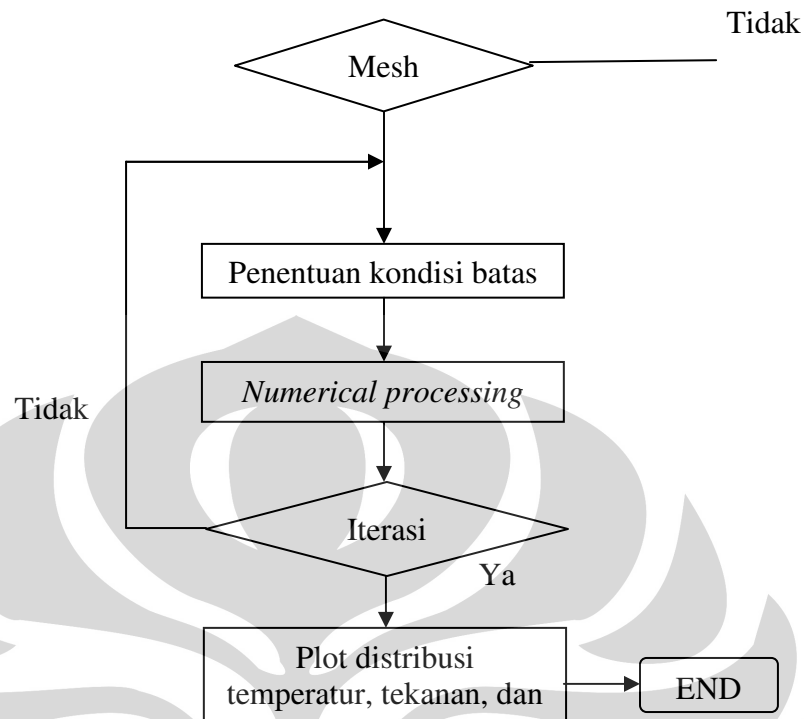
#### 2.6.4. Merencanakan Analisa CFD

Ketika hendak menyelesaikan suatu kasus menggunakan metode CFD, maka harus diperhatikan beberapa hal, yaitu:

1. Menentukan tujuan permodelan
  - Parameter apa saja yang diinginkan dari model CFD?
  - Sampai sejauh mana derajat akurasi yang diinginkan?
2. Pemilihan model komputasional
  - Bagaimana kita akan memodelkan suatu sistem fisik tersebut?
  - Kondisi batas apa saja yang diinginkan?
  - Apakah model itu dapat dimodelkan dalam 2D atau harus 3D?
  - Elemen mesh apakah yang paling cocok untuk kasus tersebut?
3. Pemilihan model fisik
  - Apakah aliran pada kasus tersebut inviscid, laminar, atau turbulen?
  - Apakah aliran tersebut tunak atau transien (unsteady)?
  - Apakah perpindahan kalor pada model tersebut ingin ditinjau?
  - Apakah fluida yang dipergunakan fluida kompresibel atau inkompresibel?
4. Penentuan prosedur
  - Apakah kasus tersebut dapat diselesaikan menggunakan formula solver dan parameter solusi standar?
  - Apakah hasil yang konvergen dapat diperoleh lebih cepat dengan menggunakan prosedur solusi yang berbeda?



Universitas Indonesia



Gambar 2.6 Diagram alir prosedur simulasi

## 2.7. KOMPONEN-KOMPONEN PADA MINI ICE PLANT

*Mini Ice Plant* memerlukan beberapa komponen agar dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan yang diharapkan. Komponen-komponen tersebut di antaranya adalah: peti kemas (*container*), pompa *Submersibel*, *Ice Bank*, *Ice Can*, rak cetakan es, *Hoist*, *Rel Hoist*, *Water Reservoir*, *Dip Tank*, *Tilting*, dan mesin refrigerasi

### 2.7.1. Peti Kemas (*Container*)

Petikemas yang digunakan sebagai *Mini Ice Plant* ini adalah petikemas standard berukuran 20 ft dengan dimensi internal panjang 5.896 mm, lebar 2.350 mm dan tinggi 2.385 mm.



Gambar 2.7 Peti kemas

Petikemas ini memiliki beberapa komponen, seperti:

1. Ruang mesin

Bagian ruang mesin petikemas ini berisi komponen utama dari mesin pendingin seperti kompresor, kondensor, dan lain-lain.

2. Ruang produksi es

Ruang ini memiliki area yang lebih luas dari pada ruang mesin. Pada ruang produksi es terdapat beberapa komponen dari *Mini Ice Plant*.

3. Insulasi

Untuk mengurangi terjadinya perpindahan kalor dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah diperlukan adanya pembatas berupa insulasi. Pada bagian dinding-dinding petikemas dilapisi dengan insulasi berupa *polyurethane*. Dan untuk mengurangi perpindahan kalor dari ruang mesin

keruang pendingin, maka dilapisi dengan *sandwich panel* yang terdiri dari 3 lapisan, yaitu *carbon steel – polyurethane – carbon steel*.



Gambar 2.8 Insulasi pada dinding peti kemas

### 2.7.2. Pompa Submersibel

Untuk mempercepat proses perpindahan kalor diperlukan alat yang dapat mensirkulasikan air garam (*Brine*). Proses perpindahan kalor pada air garam secara konveksi dipengaruhi oleh kecepatan dari aliran *refrigeran*. Jika aliran terlalu lambat, maka perpindahan kalor yang terjadi tidak akan maksimal. Pompa submersible merupakan pompa yang dapat direndam dan dapat mengalirkan fluida secara reversible.

### 2.7.3. Ice Bank

*Ice bank* adalah tempat dimana air yang sudah tuang kedalam cetakan es (*ice can*) akan membeku dan menjadi es balok. Pada *ice bank* terjadi perpindahan kalor dari air yang ada didalam cetakan es (*ice can*) ke air garam (*brine*) yang berfungsi

sebagai *refrigerant* sekunder. *Ice bank* ini berukuran panjang 390 cm, lebar 216 cm, dan tinggi 55 cm.



Gambar 2.9 *Ice Bank*

#### 2.7.4. Ice Can

*Ice can* (cetakan es) ini berfungsi sebagai wadah untuk mencetak es. Bentuk dari cetakan ini adalah limas segi 4 terpancung, hal ini bertujuan agar mempermudah proses pengambilan es dari dalam cetakan. Pada saat proses produksi es berlangsung, cetakan es yang diisi air untuk dibekukan menjadi es dengan menggunakan media pendinging *Brine* (air garam).

Oleh karena itu, material dari cetakan harus memenuhi dua aspek, yaitu:

4. Aspek konduktifitas thermal

Sebagai medium perantara antara brine dan air, material cetakan es harus memiliki konduktifitas thermal yang baik agar proses perpindahan kalor dapat terjadi secara cepat dan maksimal.

5. Aspek ketahanan terhadap karat

Dengan bersentuhannya cetakan es (*ice can*) dengan *Brine* (air garam), maka material cetakan es rentan terhadap karat. Oleh karena itu diperlukan material yang dapat tahan terhadap karat seperti *galvanized steel*.



Gambar 2.10 *Ice Can*

#### **2.7.5. Rak Cetakan Es**

Rak cetakan es ini berfungsi sebagai tempat dudukan cetakan es pada saat diletakan didalam *ice bank*. Setiap rak cetakan es dapat menampung 8 buah cetakanes. Pada saat proses panen es, es balok diangkat dari *ice bank* berikut dengan cetakan es dan raknya. Dengan adanya rak ini, cetakan es dapat disusun dengan mudah dan teratur.



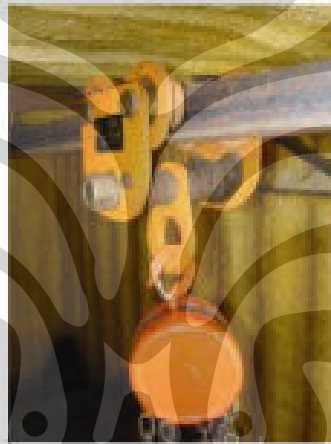
Gambar 2.11 Rak cetakan es



### 2.7.6. Hoist

*Hoist* digunakan untuk mengangkat dan memindahkan es balok berikut dengan cetakan dan raknya pada saat proses panen. Rangkaian es balok ini di angkat dan dipindahkan dari *ice bank* menuju *dip tank* dan kemudian menuju *tilting*. Oleh karena itu *hoist* yang digunakan pada *Mini Ice Plant* ini harus memiliki dua derajat kebebasan, yaitu mampu bergerak maju dan mundur sepanjang rel hoist. Selain itu juga harus dapat menaikkan atau menurunkan beban.

Pada *Mini Ice Plant* ini digunakan *hand chain hoist* berkapasitas 500 kg yang penggunaannya dilakukan secara manual. Pengangkatan cetakan es dari *ice bank* dilakukan dengan mengaitkan *hook* pada rak cetakan es.



Gambar 2.13 *Hoist*

### 2.7.7. Rel Hoist

*Hoist* yang digunakan untuk mengangkat dan memindahkan cetakan es (*ice can*) dipasang pada rel yang ada di dinding atas sepanjang petikemas. Rel ini dibuat terbuat dari baja profil L yang disatukan pada bagian sisinya hingga membentuk profil T. Rel dipasang pemegang rel yang juga terbuat dari baja profil L.



Gambar 2.14 *Rel Hoist*

#### 2.7.8. Water Reservoir

Pada saat proses panen es, es balok yang sudah jadi di dikeluarkan dari cetakan es. Setelah itu cetakan es diisi dengan air untuk proses produksi es balok selanjutnya. Pengisian cetakan es ini dapat dilakukan dengan adanya *waterreservoir* yang berfungsi sebagai penampung air sebagai bahan dasar es balok.

#### 2.7.9. Penutup Bak

Untuk mengurangi terjadinya perpindahan kalor dari udara kabin petikemas ke dalam *ice bank*, maka perlu adanya isolator panas yang dapat menutupi seluruh cetakan es dan evaporator yang ada didalam *ice bank*. Material yang digunakan sebagai penutup bak ini tidak perlu terlalu kuat, namun harus merupakan jenis isolator panas yang baik, sehingga material yang digunakan adalah kayu berupa papan yang diberikan *handle* pada bagian tengahnya agar mudah untuk diangkat.

#### 2.7.10. Dip Tank

*Diptank* adalah tempat melakukan pemisahan antara es balok dengan *can*. Setelah air es sudah membeku sepenuhnya, maka satu rak *ice can* akan diangkat oleh *hoist* dan kemudian akan dipindahkan ke *dip tank*. Di dalam *dip tank* es direndam kembali dengan menggunakan air yang temperaturnya lebih tinggi, fungsinya agar permukaan es balok es balok yang menempel dengan permukaan cetakan es dapat mencair. Setelah es mulai mengambang barulah diangkat untuk dilakukan proses

**Universitas Indonesia**

pengeluaran. Temperatur air dalam diptank tidak boleh lebih dari 21,1 °C untuk menghindari adanya tegangan pada es dan retakan.



Gambar 2.15 Diptank

#### 2.7.11. Tilting

*Tilting* adalah suatu alat yang digunakan sebagai tempat untuk mengeluarkan es balok dari cetakannya. Es balok yang berada dalam cetakan es yang tersusun pada rak diangkat dan dimasukkan ke dalam *tilting*, selanjutnya dirobohkan agar es balok dapat keluar. Pada saat proses perobohan ini rantai dari *hoist* sebaiknya harus tetap terkait pada rak cetakan es agar ada yang menahan dan lebih mudah saat pengangkatan cetakan es.



Gambar 2.16 *Tilting*

### 2.7.12. Mesin Refrigerasi

Proses refrigerasi yang dilakukan pada *Mini Ice Plant* ini rencananya akan menggunakan siklus kompresi uap. Sebagian besar dari komponen mesin refrigerasi berada pada bagian ruang mesin dari petikemas. Berikut ini beberapa komponen utama pada mesin refrigerasi dengan siklus kompresi uap:

#### 1. Kompresor

Kompresor adalah alat yang digunakan untuk menghisap uap refrigerant dan mengkompresinya sehingga tekanan uap refrigerant naik sampai ke tekanan yang diperlukan untuk pengembunan (kondensasi) uap refrigerant di dalam kondenser.



Gambar 2.17 Kompresor *Tecumseh* 2,5 pk dan 1,5 pk

Sumber: [www.tecumseh.com](http://www.tecumseh.com)

Pada kompresor, persamaan kekekalan energi yang berlaku adalah:

$$-W_{\text{kompresor}} = \Delta H \quad (2.5)$$

$$W_{\text{kompresor}} = H_1 - H_2 \quad (2.6)$$

Di mana:  $W_{\text{kompresor}}$  = daya yang dibutuhkan kompresor (W)

$H_1$  = entalpi pada titik 1

$H_2$  = entalpi pada titik 2

## 2. Kondenser

Kondensor merupakan alat penukar panas yang berguna untuk mendinginkan uap refrigerant dari kompresor agar dapat mengembun menjadi cairan. Pada saat pengembunan ini, refrigerant mengeluarkan sejumlah kalori (panas pengembunan) yang mana panas ini diterima oleh media pendingin di dalam kondensor.



Gambar 2.18 Kondenser

### 3. Peralatan Ekspansi

Setelah kompresor dan kondensor peralatan dasar sistem kompresi uap adalah peralatan ekspansi. Dua fungsi peralatan ekspansi adalah menurunkan tekanan cairan refrigeran, dan harus bisa mengatur aliran refrigeran ke evaporator. Jenis yang umum sebagai peralatan ekspansi adalah pipa kapiler (capillary tube), katup ekspansi termostatik (thermostatic expansion valve), low-side float valve, dan katup ekspansi tekanan konstan (constant pressure expansion valve).



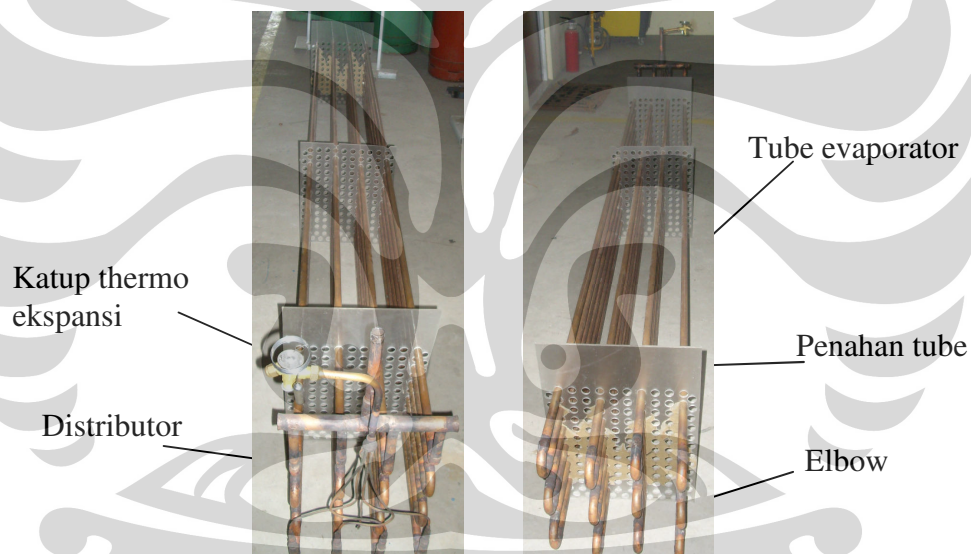
Gambar 2.19 TX-Valves

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

Jenis peralatan ekspansi yang paling dikenal untuk sistem refrigerasi ukuran menengah adalah katup ekspansi termostatik. Nama “termostatik” dapat menyalah artikan karena kontrol adalah dilakukan bukan oleh temperatur dalam epevaporator, tapi oleh jumlah gas hisap panas lanjut yang meninggalkan evaporator. Katup ekspansi termostatik mengatur laju aliran cairan refrigeran dalam kesebandingan dengan laju penguapan dalam evaporator.

#### 4. Evaporator

Suatu evaporator dalam sistem refrigerasi adalah penukar panas yang memindahkan panas dari zat yang didinginkan ke refrigeran menguap. Tujuan sistem refrigerasi adalah membebaskan panas dari udara, air, atau beberapa benda yang lain. Pembebasan itu dilakukan oleh evaporator.



Gambar 2.20 Evaporator

#### 5. Aksesoris

Di dalam mendisain siklus pendingin, selain mempergunakan komponen-komponen utama, dibutuhkan juga komponen tambahan atau aksesoris. Aksesoris tersebut antara lain :

➤ **Check valve**

Untuk mengalirkan fluida (liquid atau gas) hanya ke satu arah. Prinsip kerja dari check valve ini adalah aliran refrigeran mempunyai tekanan yang cukup untuk membuka valve yang ada sehingga refrigeran dapat mengalir.



Gambar 2.21 Check Valves

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

➤ **Filter drier**

Untuk menyaring refrigeran dari moisture yang mungkin terjadi selama proses instalasi dan sebagai penetralisir asam yang merupakan hasil interaksi dari moisture dan oli.



Gambar 2.22 Filter Dryer

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

➤ **Oil separator**

Berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk memisahkan oli dengan refrigeran, prinsip kerja dari oil separator ini menggunakan prinsip perbedaan massa jenis dan specific gravity antara oli dengan refrigeran.

**Universitas Indonesia**





Gambar 2.23 Oil Separator

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

➤ **Sight glass**

Berfungsi untuk mengindikasikan kondisi refrigeran di dalam liquid line dan kandungan moisture dari refrigeran itu sendiri.



Gambar 2.24 Sight Glass

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)

➤ **Pressure control**

Berfungsi sebagai alat safety, mencegah kerusakan sistem apabila terjadi tekanan yang terlalu rendah pada suction atau tekanan terlalu tinggi pada discharge kompresor. Dapat mematikan sistem secara otomatis.



Gambar 2.25 Pressure Control

Universitas Indonesia

Sumber: [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com)



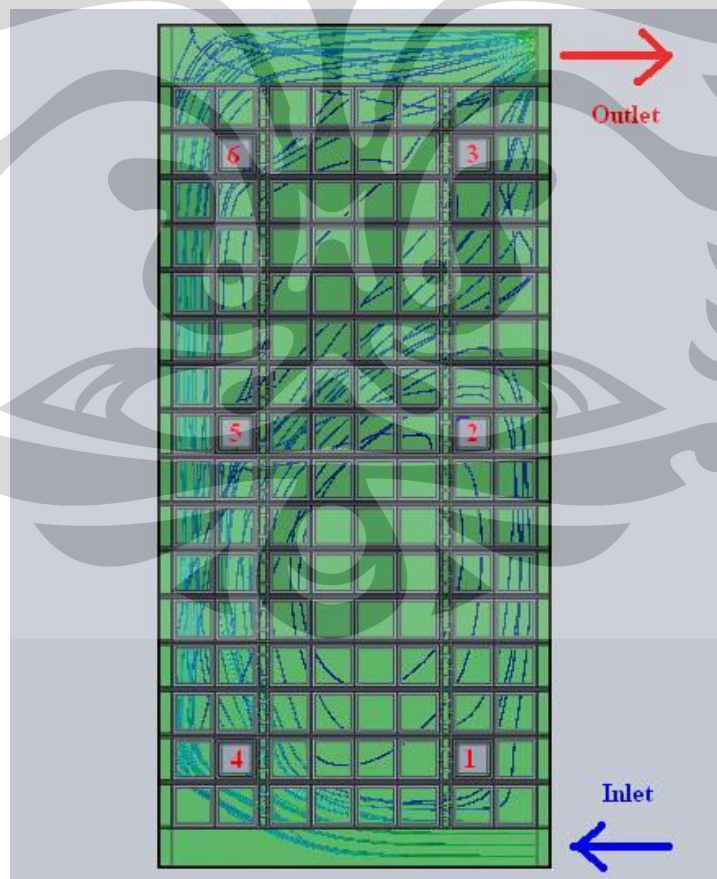
**Universitas Indonesia**

### BAB 3

## PERANCANGAN GEOMETRI DAN PENENTUAN KONDISI BATAS PADA SIMULASI

Simulasi merupakan kegiatan untuk memodelkan suatu sistem dengan suatu kondisi yang telah ditentukan dengan menggunakan bantuan komputer, tujuan simulasi ini sendiri adalah untuk mengetahui distribusi aliran *brine* serta distribusi laju solidifikasi pada *Mini Ice Plant*. Dengan memaksimalkan sistem aliran pada bak tersebut, maka akan meningkatkan laju solidifikasi pada air didalam can dan juga agar laju solidifikasi di setiap titik hampir merata. Simulasi CFD menggunakan prgram *Fluent 6.3.16*.

Simulasi dilakukan dengan kondisi batas sesuai dengan kondisi pengukuran yang akan dilakukan.



Gambar 3.1 Skema tampak atas Mini Ice Plant dan arus aliran *brine*

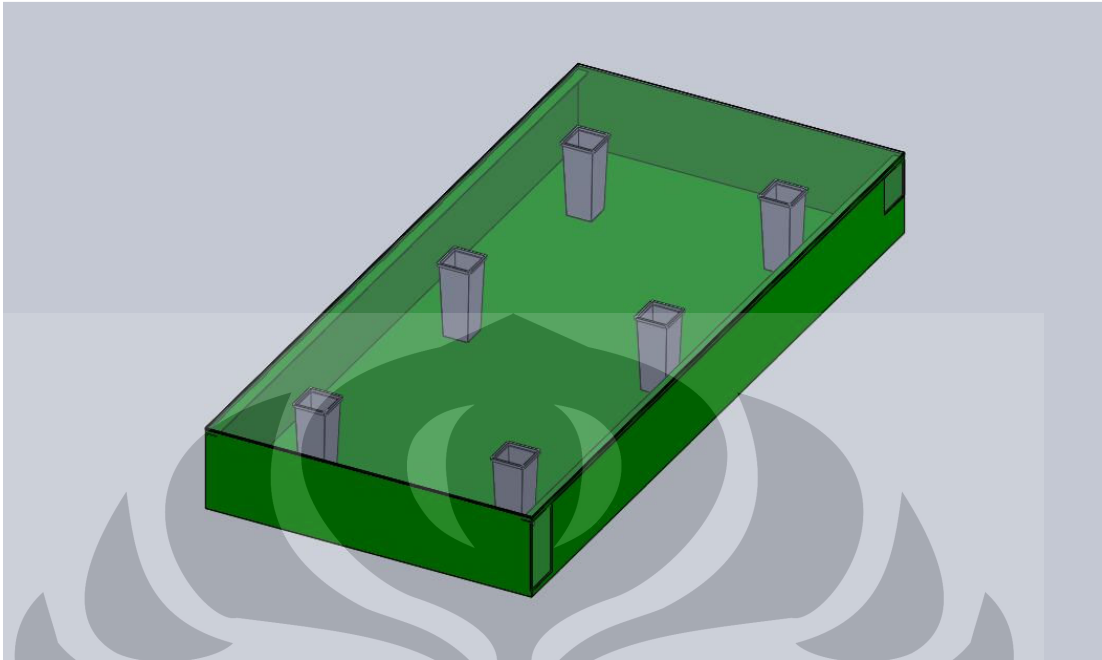
Gambar 3.1 menjelaskan bentuk geometri serta distribusi aliran pada Mini Ice Plant. Simulasi ini bertujuan untuk melihat proses pembekuan pada beberapa *can*. Simulasi ini didasarkan pada percobaan pengukuran yang dilakukan. Pengukuran yang dilakukan hanya melibatkan beberapa *can* seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.1. Hal ini dikarenakan sulitnya mendapatkan data yang akurat apabila melakukan pengukuran dengan melibatkan semua *can* yang ada.

Proses aliran *brine* yang ada adalah aliran *brine* melewati bak yang berisi evaporator dan mengalami proses perpindahan kalor dengan evaporator sehingga temperatur *brine* turun sampai nilai 272,15 K. *Brine* tersebut lalu memasuki bak yang berisi susunan *can* yang berisi air dengan temperatur 300 K. *Brine* yang memasuki susunan *can* mengalami proses perpindahan kalor dengan *can-can* yang berisi air. *Brine* yang telah menerima kalor lalu keluar dari dalam bak yang berisi *can* yang digerakan oleh pompa submersible dan dialirkan kembali menuju rangkaian evaporator. Proses ini dijalankan terus menerus sampai air yang berada di dalam *can* berubah fase menjadi es.

### 3.1. PEMBUATAN GEOMETRI

Tahap pertama yang dilakukan dalam simulasi ini adalah pembuatan geometri. Untuk mempermudah dan mempercepat proses simulasi solidifikasi, maka dilakukan penyederhanaan bentuk geometri. Penyederhanaan yang dilakukan adalah menghilangkan bentuk-bentuk geometri yang rumit dan kurang mempengaruhi proses perpindahan kalor pada simulasi. Geometri yang rumit tersebut akhirnya akan memperlambat proses iterasi yang ada pada simulasi. Salah satu contoh geometri yang rumit dan perlu dihilangkan pinggiran-pinggiran bagian atas *can* dan penyangga-penyangga *can*.

Geometri yang dibuat dalam simulasi ini memiliki dimensi dengan lebar dalam sumbu x sebesar 2170 mm, tinggi dalam sumbu y sebesar 460 mm, dan panjang dalam arah sumbu z sebesar 4000 mm.



Gambar 3.2 Skema isometri pada Mini Ice Plant

Pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan program *Gambit* 2.3.16. Tujuan utama pembuatan geometri pada *Gambit* adalah:

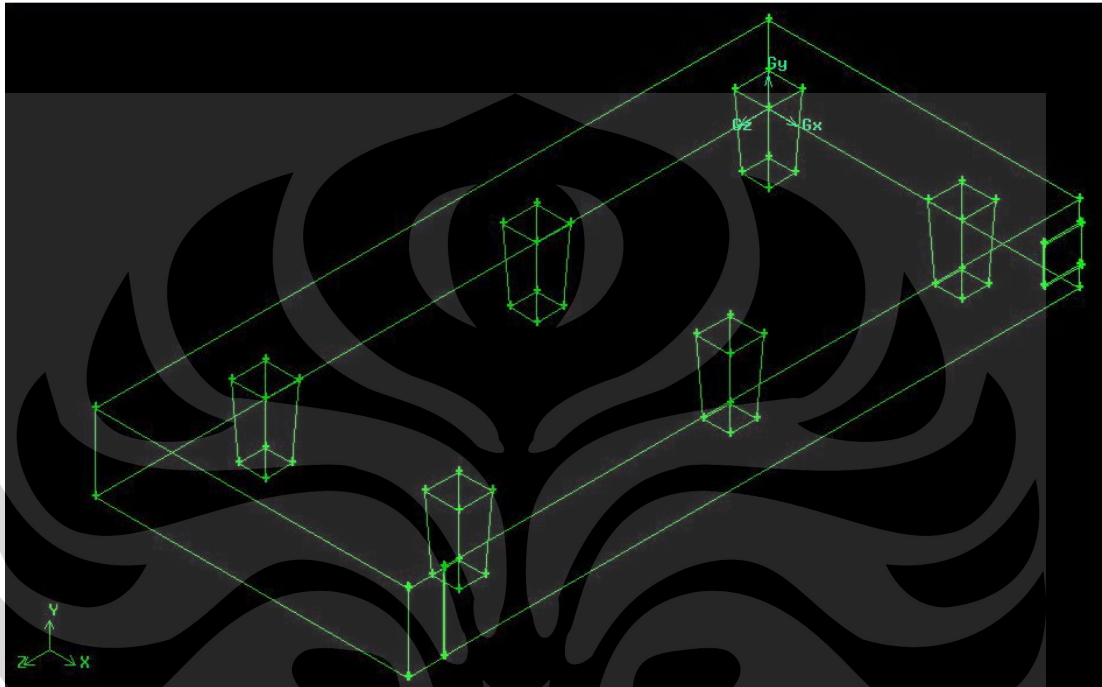
1. Untuk membuat dan mendefinisikan daerah yang akan dilalui oleh fluida serta melakukan proses meshing pada daerah tersebut (untuk masalah aliran fluida) sehingga dapat dianalisis pada program CFD.
2. Apabila perpindahan kalor yang terjadi pada daerah solid (padat) juga hendak dianalisis pada program CFD maka daerah solid obyek tersebut juga harus dibuat, didefinisikan kondisi batasnya dan dilakukan proses meshing pada daerah solid tersebut.

Untuk membuat geometri pada *Gambit* digunakan beberapa istilah sebagai berikut:

1. *Vertex* (titik)
2. *Edge* (garis)
3. *Face* (bidang)
4. *Volume*

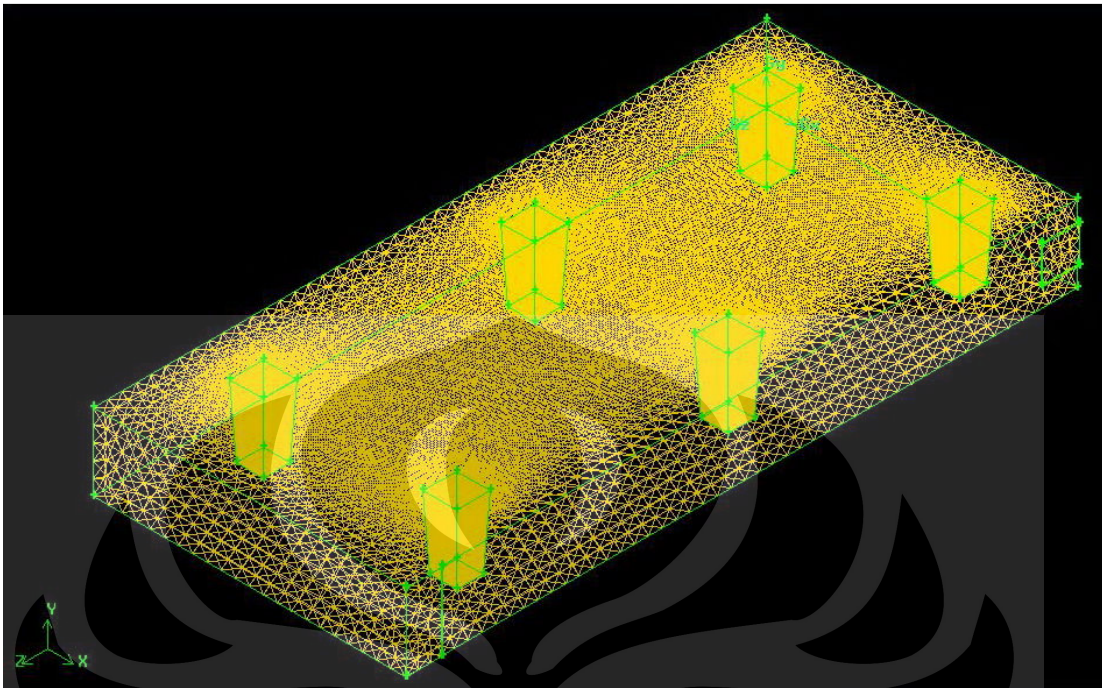
Pembuatan geometri ini harus dilakukan menggunakan program *Gambit* dan tidak dapat menggunakan program *Solid Works* yang kemudian diekspor dalam

bentuk STEP. Hal ini dikarenakan dalam simulasi solidifikasi menggunakan program *Fluent* memerlukan fitur *shadow* untuk bagian *wall* sebagai pembatas antara *brine* dengan air. Hal ini sangat sulit dilakukan bila pembuatan geometri menggunakan program *Solid Works* yang kemudian diekspor dalam bentuk STEP.



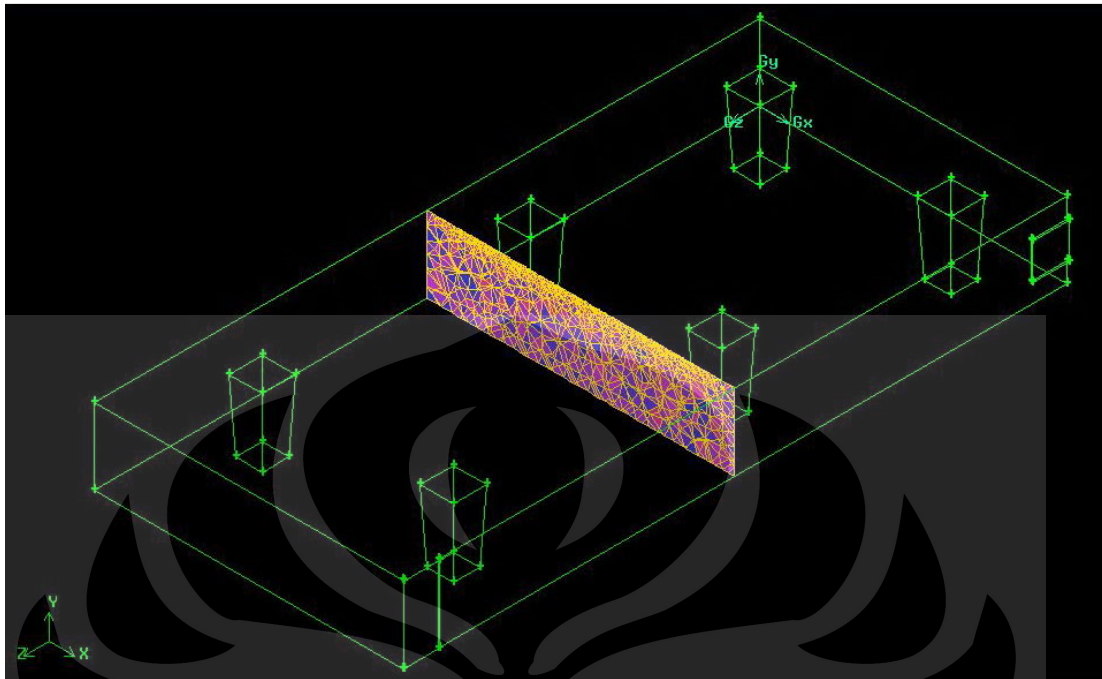
Gambar 3.3 Hasil pembuatan geometri Mini Ice Plant menggunakan *Gambit*

Setelah melakukan pembuatan geometri, langkah selanjutnya yang harus dilakukan adalah pembuatan mesh. Pembuatan mesh yang dilakukan adalah membuat mesh pada bidang. Jenis elemen mesh yang digunakan adalah *Tet/ Hybrid* dengan tipe *TGrid* dan nilai *interval size* yang digunakan adalah 10 untuk *can-can* yang berisi air dan 85 untuk bak yang berisi *brine*. Perbedaan nilai *interval size* ini bertujuan untuk melakukan optimasi pada *mesh* agar proses iterasi yang dilakukan tidak terlalu lama. *Interval size* pada *can-can* yang berisi air lebih kecil dibandingkan dengan bak yang berisi *brine* karena diinginkan hasil yang akurat pada proses pembekuan air yang ada di dalam *can*.



Gambar 3.4 Hasil pembuatan *Mesh*

Setelah melakukan pembuatan mesh, langkah selanjutnya adalah memeriksa mesh yang telah dibuat. Hal ini bertujuan untuk memastikan apakah mesh yang telah dibuat terdapat kesalahan atau tidak. Kesalahan pada pembuatan mesh akan menyebabkan kegagalan pada proses simulasi. Oleh karena itu, sebelum melanjutkan ke langkah selanjutnya, sebaiknya perlu diperiksa terlebih dahulu apakah mesh yang telah dibuat terdapat kesalahan atau tidak. Untuk memeriksa mesh yang telah dibuat dapat dilakukan dengan cara memilih pilihan *Examine Mesh* pada *Gambit* lalu memilih pilihan *Display Cut*. Bila tidak terdapat kesalahan, maka bentuk geometri akan terbentuk seperti gambar di bawah ini:



Gambar 3.5 Hasil pemeriksaan *Mesh*

### 3.2. PENDEFINISIAN MATERIAL

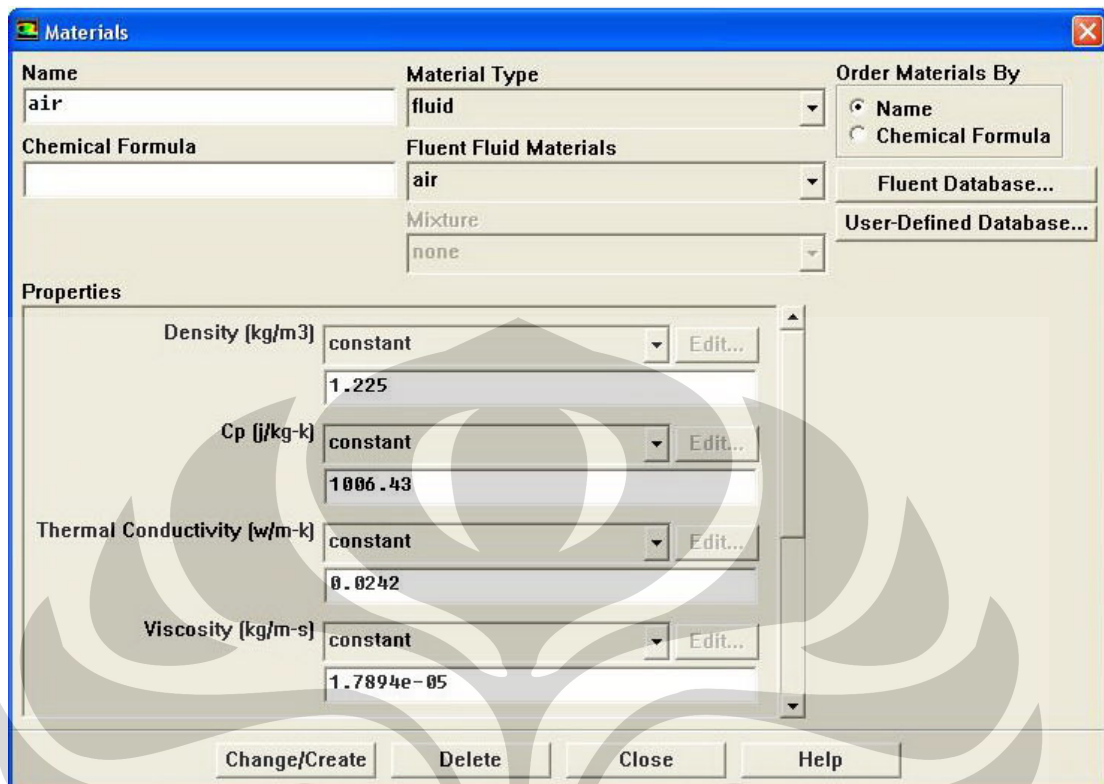
Langkah yang penting dalam pemodelan di *Fluent* adalah mendefinisikan sifat material. Sifat material didefinisikan di panel material dengan perintah:

Define → Material

Sifat material tersebut dapat ditentukan nilainya secara konstan, tergantung temperaur (*temperature-dependent*) berdasarkan *Polynomial*, *Piecewise-Linear*, fungsi *Piecewise-Polynomial*, atau didefinisikan berdasarkan teori kinetik (*Kinetic Theory*). Panel material akan menampilkan sifat yang diperlukan untuk model yang telah ditentukan, misalnya apabila tidak mengaktifkan persamaan energi, maka konduktifitas termal material tidak akan muncul dalam panel material.

Secara *default*, pada panel material seperti yang terlihat pada gambar 3.6 hanya akan menampilkan satu material fluida (udara/ air) dan satu material pada (aluminium).





Gambar 3.6 Panel material

Jika fluida yang terlibat pada model adalah udara, maka dapat menggunakan sifat udara yang sudah ada atau mengubah sifat udara sesuai dengan model/ kasus yang diinginkan.

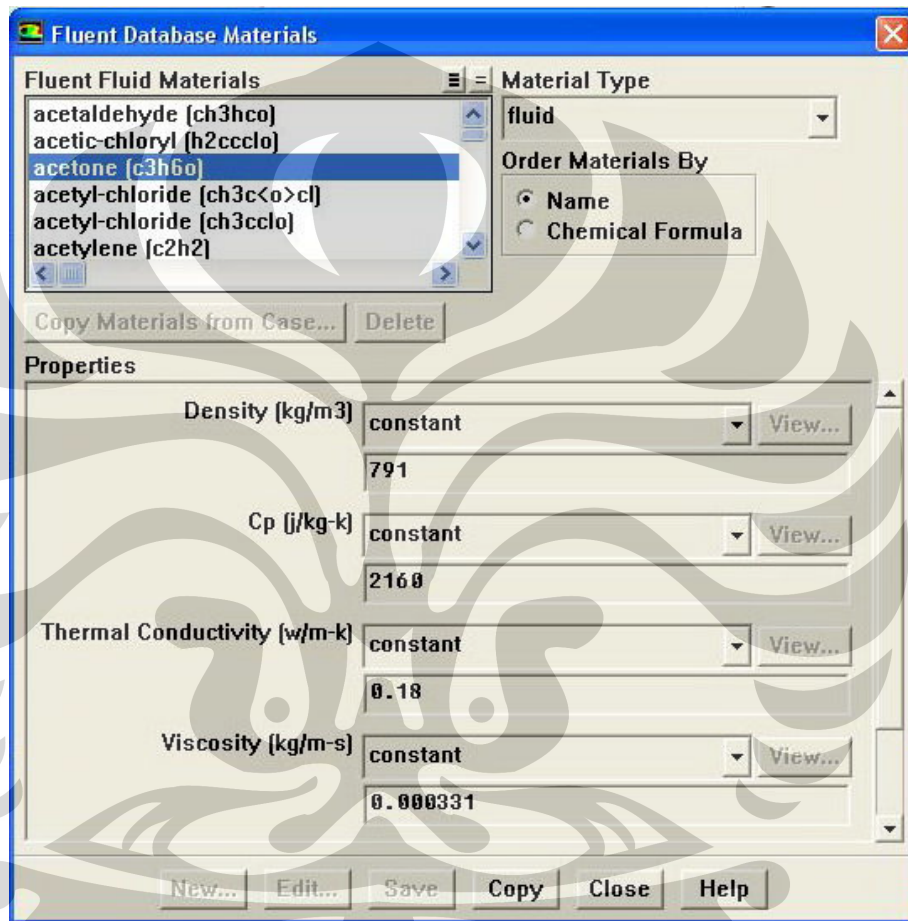
Prosedur untuk mengubah sifat material adalah sebagai berikut:

1. Pilih tipe material (*fluid/ solid*) pada daftar **Material Type**.
2. Pilih material yang akan diubah sifatnya pada daftar **Fluid Materials/ Solid Materials**.
3. Ubah nilai sifat material yang diinginkan. Pada masing-masing sifat material dapat dipilih metode yang dipakai untuk penentuan sifat material apakah konstan, tergantung temperatur (*temperature-dependent*) berdasarkan polynomial, *piecewise-linear*, fungsi *piecewise-polynomial*, atau didefinisikan berdasarkan teori kinetik (*kinetic-theory*).
4. Klik tombol **Change/ Create** untuk mengubah sifat material yang akan dipilih.

Universitas Indonesia

Apabila material yang digunakan pada model bukan udara/ aluminium, maka harus menyalin material dari database ke daftar material pada *Fluent*. Prosedur untuk menyalin material dari database adalah sebagai berikut:

1. Klik tombol **Database** pada panel material untu membuka database material seperti yang terlihat pada gambar 3.7



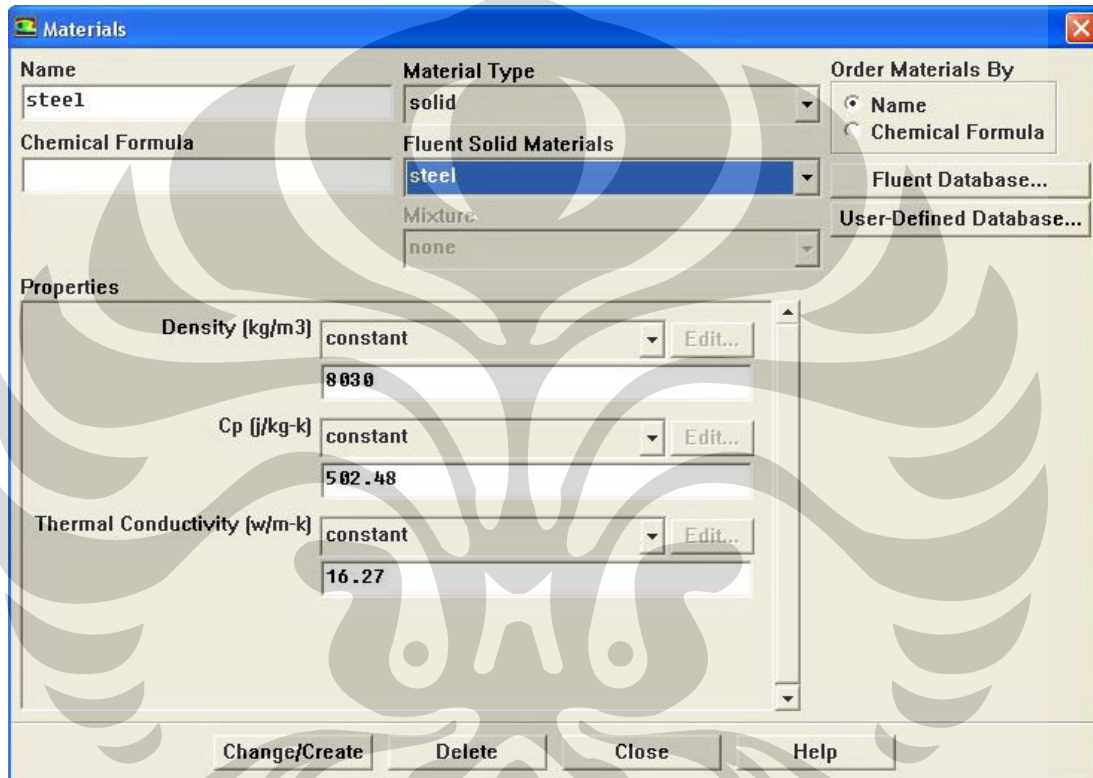
Gambar 3.7 Panel *database* material

2. Pilih tipe material (*fluid/ solid*) pada daftar **Material Type**.
3. Pilih material yang akan disalin pada daftar *Fluid Materials/ Solid Materials*. Sifat material yang ada pada database tidak dapat diubah, tetapi dapat diubah sifat material tersebut setelah disalin pada daftar material.
4. Klik tombol **Copy**. Sifat material tersebut akan disalain daro database ke daftar material.

5. Ulangi proses di atas apabila ingin menambahkan material yang lain.

### 3.2.1. Galvanized Steel

Galvanized steel digunakan sebagai pembentuk bak dan Ice Can, tetapi dalam simulasi ini penggunaannya disederhanakan sebagai *coupled wall* yaitu daerah batas antara air dan *brine*. Galvanized Steel memiliki konduktivitas termal sebesar  $16.27 \text{ W/m.K}$ .

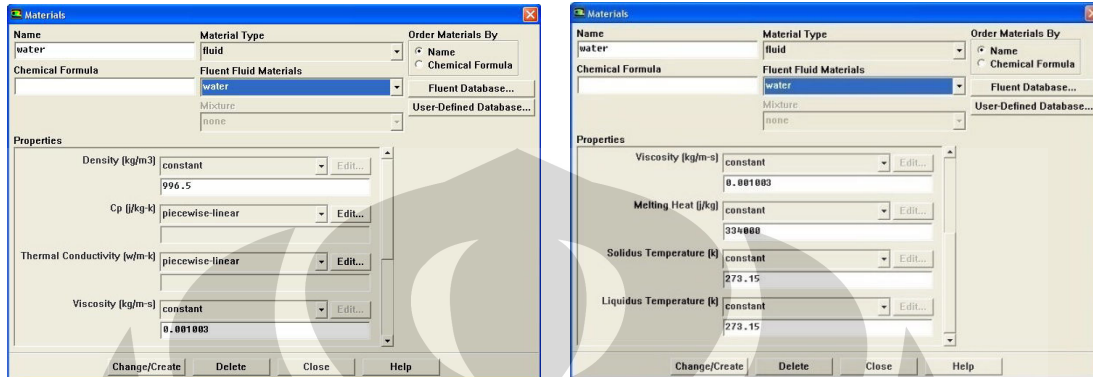


Gambar 3.8 Pendefinisian material *Galvanized Steel*

### 3.2.2. Air (H<sub>2</sub>O)

Air (H<sub>2</sub>O) dalam simulasi ini merupakan material fluida yang nantinya akan dipadatkan menjadi es dan dalam proses solidifikasi ini yang harus diperhatikan adalah perubahan drastis sifat-sifat fisis antara air dalam fase cair dengan air pada fase padat (es). Gambar 3.6 menjelaskan pengaturan property air dalam program *Fluent* dengan densitas sebesar  $996.5 \text{ kg/m}^3$  dan nilai viskositas yang digunakan sebesar  $0.001003 \text{ kg/ms}$ . Penentuan properti kalor jenis dan konduktivitas termal yang berubah terhadap suhu menggunakan metode Piecewise-Linear. Gambar 3.7

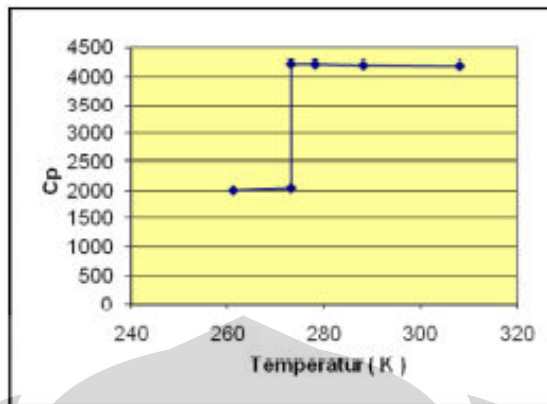
menjelaskan kalor laten yang dimiliki H<sub>2</sub>O sebesar 334000 J/kg dengan temperatur solidus dan liquidus pada temperatur yang sama yaitu suhu 273.15 K. Temperatur liquidus dan solidus menandakan suhu perubahan fase liquid-solid dari air.



Gambar 3.9 Pendefinisian material air (H<sub>2</sub>O)

Grafik 3.1 menjelaskan perubahan nilai Cp berdasarkan temperatur menggunakan metode Piecewise-Linear dengan 6 titik temperatur yaitu 261.15 K, 273.15K, 273.151 K, 278.15 K, 288.15 K, 308.15 K dengan Cp untuk masing-masing suhu yaitu 2010 J/kg, 2050 J/kg, 4210 J/kg, 4205 J/kg, 4186 J/kg, 4176 J/kg. Perubahan drastis nilai Cp antara suhu 273.15K dan 273.151 K disebabkan adanya perbedaan fase yang terjadi.

Grafik 3.2 menjelaskan perubahan nilai konduktivitas termal berdasarkan temperatur menggunakan metode Piecewise-Linear dengan 6 titik temperatur yaitu 261.15 K, 273.15K, 273.151 K, 278.15 K, 288.15 K, 308.15 K dengan nilai konduktivitas termal untuk masing-masing suhu yaitu 2.32 W/m.K, 2.22 W/m.K, 0.6 W/m.K, 0.6 W/m.K, 0.6 W/m.K, 0.6 W/m.K. Perubahan drastis nilai konduktivitas termal antara temperatur 273.15K dan 273.151 K disebabkan adanya perbedaan fase yang terjadi.



Grafik 3.1 Grafik Cp vs temperatur

Metode Piecewise Linear :

$$f(x) = ax + c \text{ untuk } x_0 < x < x_1$$

$$C_p = aT + c \text{ untuk } T_0 < T < T_1$$

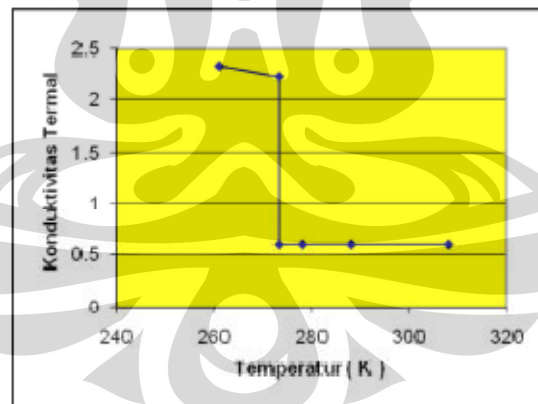
$$k = aT + c \text{ untuk } T_0 < T < T_1$$

dengan

T = Suhu

Cp = Kalor jenis

k = konduktivitas termal ( $W/m.K$ )



Grafik 3.2 Grafik konduktivitas termal vs temperatur

### 3.2.3. Brine (Larutan NaCl)

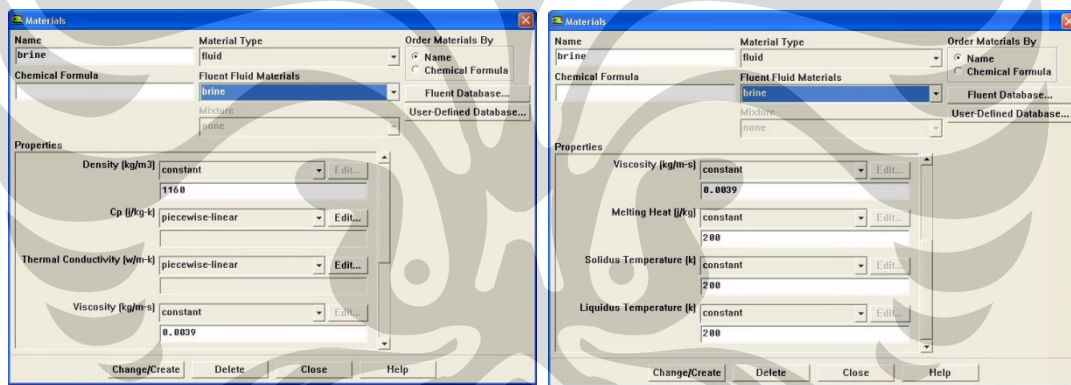
*Brine* yang digunakan dalam simulasi ini adalah larutan Sodium Klorida karena jenis garam yang digunakan mudah didapat dan murah, di samping itu lebih aman untuk digunakan pada industri makanan.

Universitas Indonesia

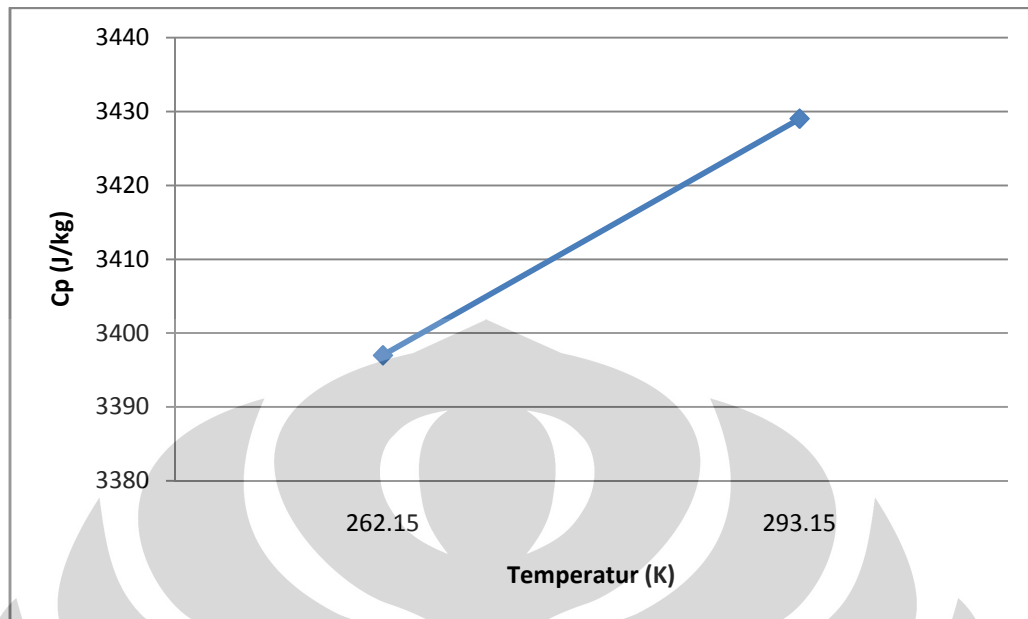
Fraksi massa dari larutan *brine* tersebut adalah 20 % mengacu pada titik *eutectic* dari larutan garam tersebut. Gambar 3.10 menjelaskan pengaturan properti pada material *brine* dengan densitas sebesar  $1160 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas sebesar  $0.0039 \text{ kg/ms}$ . Penentuan properti kalor jenis dan konduktivitas termal yang berubah terhadap suhu menggunakan metode Piecewise-Linear.

Grafik 3.3 menggambarkan perubahan properti kalor jenis terhadap suhu menggunakan metode Piecewise-Linear pada 2 titik temperatur, dengan kalor jenis sebesar  $3397 \text{ J/kg}$  pada temperatur 262.15 K dan sebesar  $3429 \text{ J/kg}$  pada temperatur 293.15 K.

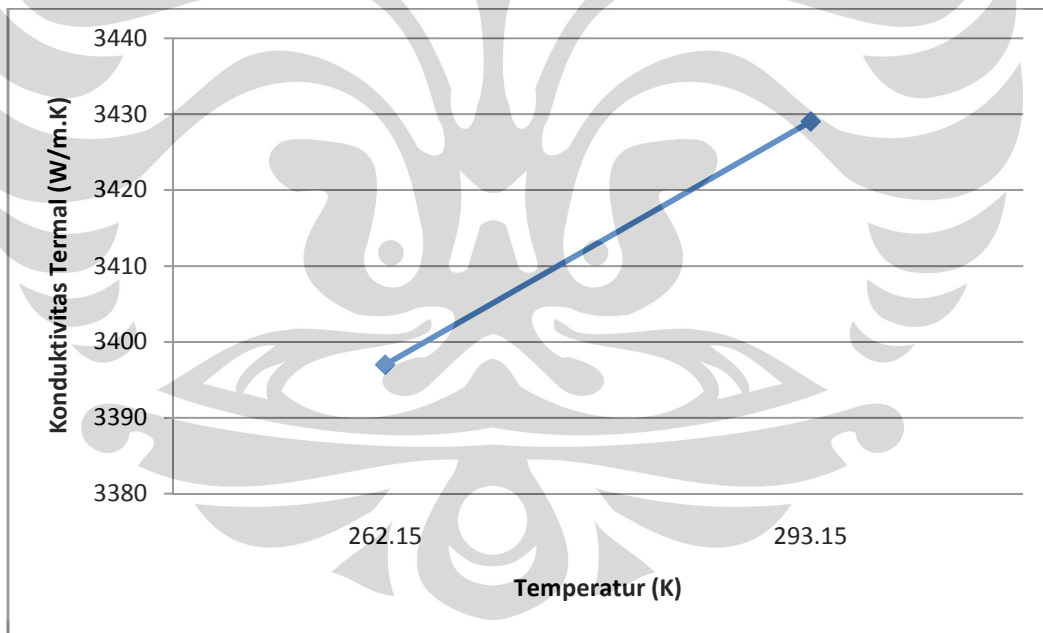
Grafik 3.4 menggambarkan perubahan properti konduktivitas termal terhadap temperatur menggunakan metode Piecewise-Linear pada 2 titik temperatur, dengan konduktivitas termal sebesar  $0.53 \text{ W/mK}$  pada temperatur 262.15 K dan sebesar  $0.577 \text{ W/mK}$  pada temperatur 293.15 K.



Gambar 3.10 Pendefinisian material *brine*



Grafik 3.3 Grafik kalor jenis vs temperatur



Grafik 3.4 Grafik konduktivitas termal vs temperatur

### 3.3. KONDISI BATAS

Untuk mendefinisikan suatu kasus, kita harus memasukan informasi pada variable aliran pada domain kasus tersebut, antara lain fluks massa, momentum, energi, dan lain-lain. Informasi tersebut salah satunya harus dimasukin dalam kondisi batas. Penentuan kondisi batas melibatkan beberapa hal, yaitu:

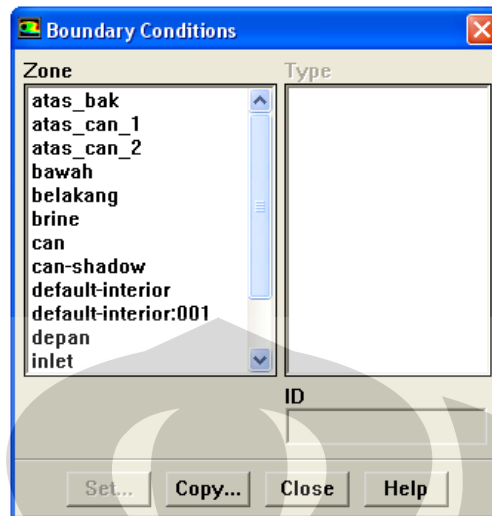
- Mengidentifikasi lokasi kondisi, misalnya: sisi masuk, sisi keluar, dinding, dan lain-lain.
- Memasukan informasi/ data pada batas yang telah ditentukan .

Data yang diperlukan pada batas (*boundary*) tergantung dari tipe kondisi batas dan model fisik yang dipakai (turbulensi, persamaan energi, multi-fasa, dan lain-lain). Data yang diperlukan (*input*) pada kondisi batas merupakan data yang sudah diketahui atau data dapat diasumsikan, tetapi asumsi data tersebut harus mendekati yang sebenarnya, karena input data yang salah pada kondisi batas akan sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi.

Lokasi kondisi batas tersebut seharusnya sudah ditentukan di *pre-processor* (*Gambit*), tetapi masih dapat diubah di *Fluent* apabila menghendaki kondisi batas yang berbeda di lokasi tersebut. Prosedur untuk mengubah kondisi batas adalah sebagai berikut:

1. Masuk ke menu kondisi batas melalui perintah:  
Define → Boundary Conditions...
2. Pilih **Zone** (lokasi) yang akan diubah kondisi batasnya.
3. Pilih kondisi batas baru pada daftar tipe kondisi batas (**Type**).





Gambar 3.11 Pendefinisian Kondisi Batas

### 3.3.1. Dinding Bak

Dinding bak merupakan kondisi berupa *wall* untuk mendefinisikan dinding di bak yang berisin *brine*. Dinding bak ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

- **Atas bak**

Merupakan tampak atas dari bak yang berisi *brine*. Pada kondisi batas atas bak ini terdapat kayu yang digunakan sebagai isolator untuk mengurangi *losses*. *Losses* yang terjadi pada kondisi batas atas bak ini adalah sebesar:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{k} \text{kayu} + \frac{1}{h} \text{kontainer}} = \frac{12 - (-1)}{0,02 + 1,02} = 12,53 \text{ W/m}^2 \quad (3.1)$$

Pada kondisi batas atas bak ini, *losses* lain yang berpengaruh adalah beban infiltrasi. Nilai dari beban infiltrasi didapat melalui persamaan:

$$Q = \frac{E \cdot v \cdot \text{Vol} \cdot n}{24} \quad (3.2)$$

Di mana: E = beda entalpi antara udara luar dan dalam

v = volume jenis ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Vol = volume ( $\text{m}^3$ )

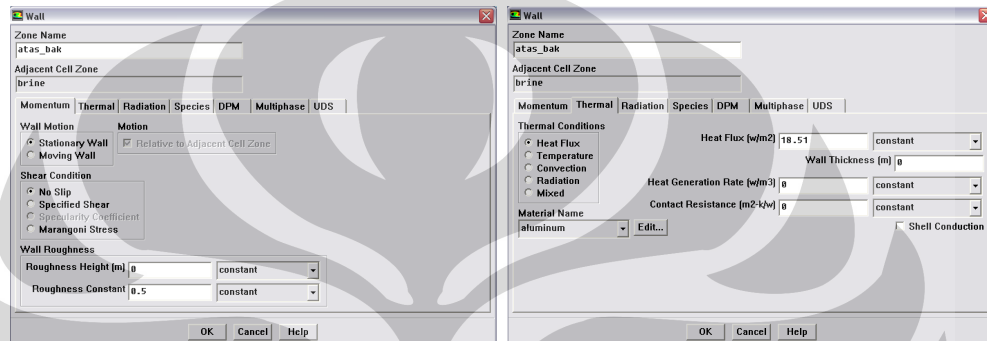
n = jumlah pertukaran udara per hari

Maka nilai dari beban infiltrasi adalah sebesar:

$$Q = \frac{20.13(0,725)(33.05)(6)(1000)}{24(3600)(5,6)} = 5,98 \text{ W/m}^2 \quad (3.3)$$

Maka jumlah *losses* total yang ada pada kondisi batas atas bak ini adalah sebesar:

$$Q = 12,53 + 5,89 = 18,51 \text{ W/m}^2 \quad (3.4)$$



Gambar 3.12 Pendefinisian kondisi batas atas bak

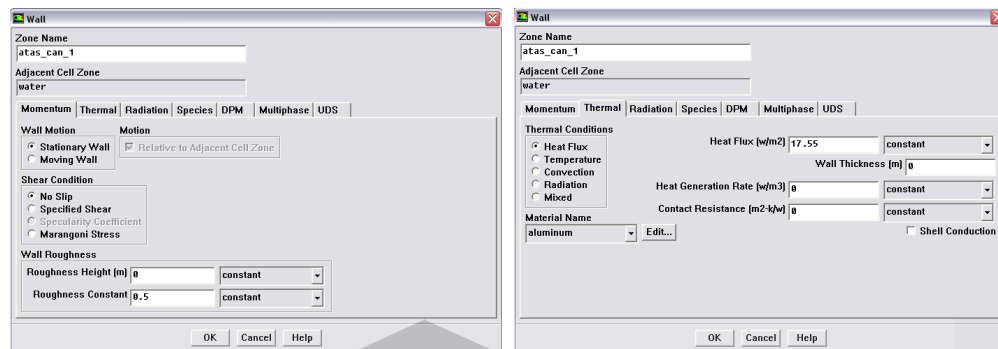
- **Atas can 1**

Merupakan tampak atas dari *can* yang berisi air. Pada kondisi batas atas *can 1* ini terdapat kayu yang digunakan sebagai isolator untuk mengurangi *losses*. Nilai *losses* yang ada adalah sebesar:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{k} \text{kayu} + \frac{1}{h} \text{kontainer}} = \frac{12-0}{0,02+1,02} = 11,57 \text{ W/m}^2 \quad (3.5)$$

Atas *can 1* ini merupakan susunan *can* yang paling dekat dengan pintu kontainer. Oleh karena itu susunan *can* ini merupakan susunan *can* yang memiliki dampak yang paling besar akibat dari beban infiltrasi. Maka jumlah *losses* total yang ada pada kondisi batas atas *can 1* ini adalah sebesar:

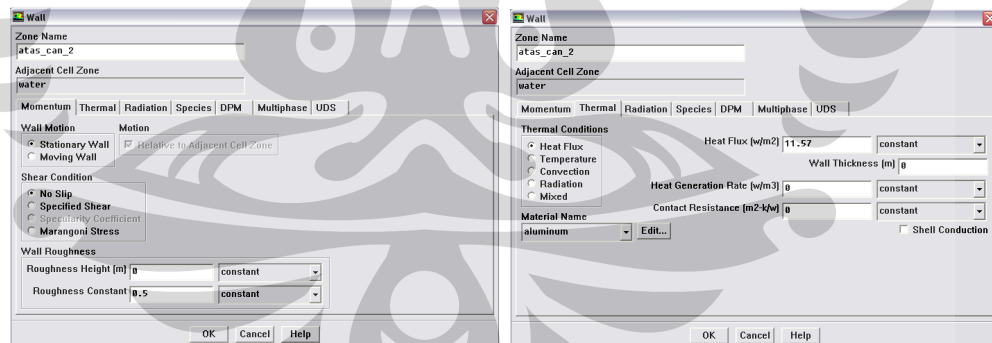
$$Q_T = 11,57 + 6 = 17,57 \text{ W/m}^2 \quad (3.6)$$

Gambar 3.13 Pendefinisian kondisi batas atas *can* 1

- **Atas *can* 2**

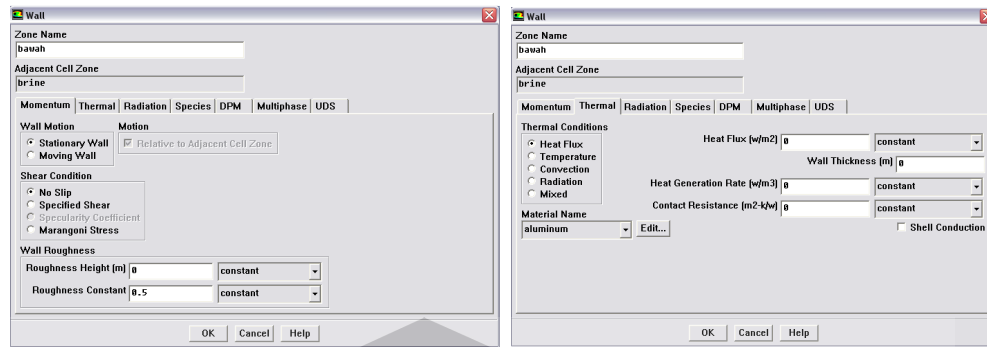
Merupakan tampak atas dari *can* yang berisi air. Pada kondisi batas atas *can* 1 ini terdapat kayu yang digunakan sebagai isolator untuk mengurangi *losses*. Nilai *losses* yang ada adalah sebesar:

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{k} \text{ kayu} + \frac{1}{h} \text{ kontainer}} = \frac{12-0}{0,02+1,02} = 11,57 \text{ W/m}^2 \quad (3.7)$$

Gambar 3.14 Pendefinisian kondisi batas atas *can* 2

- **Bawah**

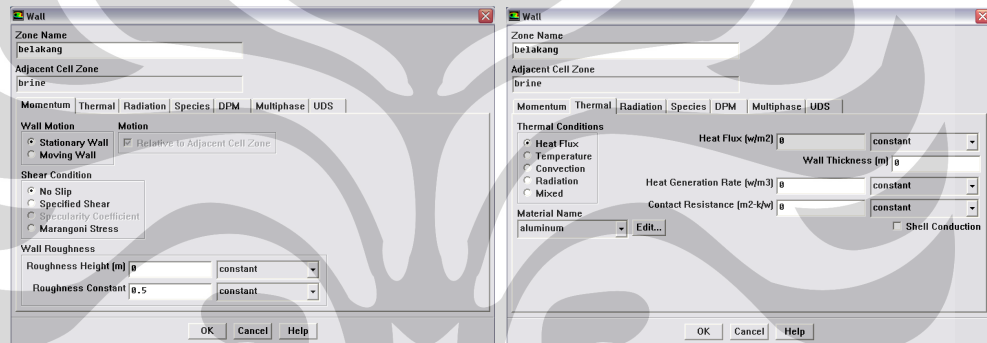
Kondisi batas di mana menggambarkan bagian bawah dari bak yang berisi *brine*.



Gambar 3.15 Pendefinisian kondisi batas bawah

- **Belakang**

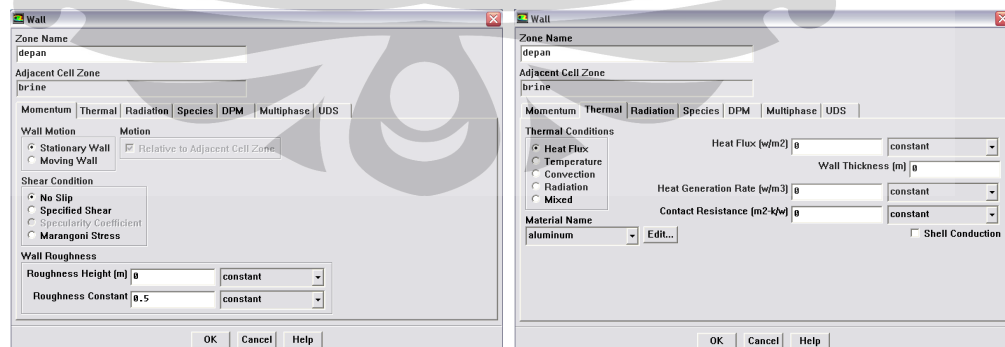
Kondisi batas di mana menggambarkan bagian belakang dari bak yang berisi *brine*.



Gambar 3.16 Pendefinisian kondisi batas belakang

- **Depan**

Kondisi batas di mana menggambarkan bagian depan dari bak yang berisi *brine*.

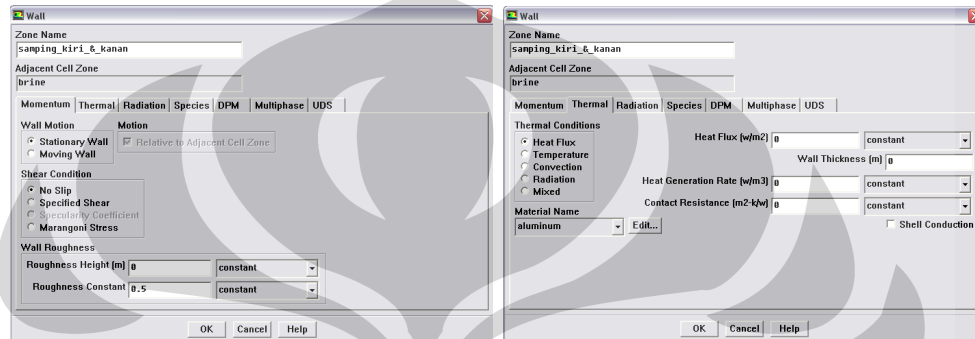


Gambar 3.17 Pendefinisian kondisi batas depan

- **Samping kiri & kanan**

Universitas Indonesia

Kondisi batas di mana menggambarkan bagian samping kiri dan kanan dari bak yang berisi *brine*. Pada kondisi batas ini, *wall* diasumsikan adiabatik karena dinding tersebut merupakan dinding isolasi yang berisi polyurethane sehingga memiliki konduktifitas termal yang kecil dan di samping itu menyederhanakan variable yang ada sehingga proses iterasi dapat lebih cepat.



Gambar 3.18 Pendefinisian kondisi batas samping kiri & kanan

Kondisi batas *wall* digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas *wall* juga digunakan sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

Pada aliran viskos, kondisi *no-slip* yang terjadi pada dinding adalah sebagai berikut:

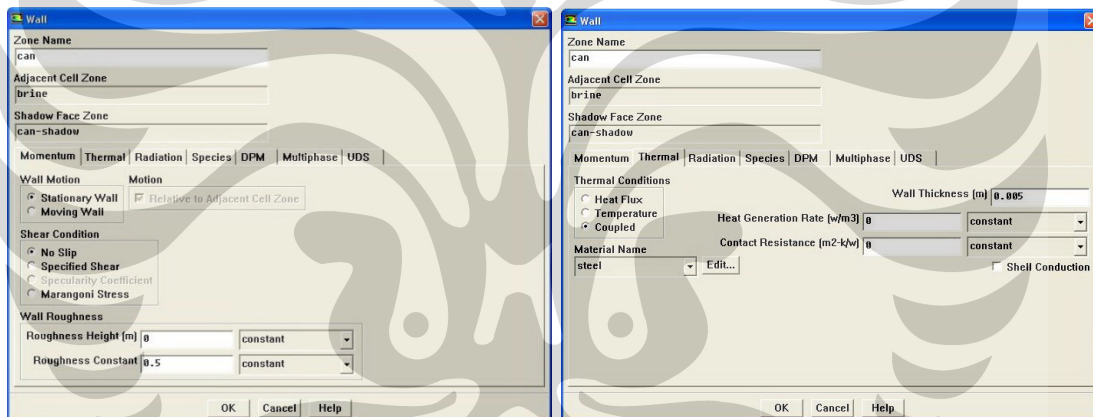
- Kecepatan tangensial fluida pada dinding sama dengan kecepatan dinding, sehingga apabila dindingnya tidak bergerak maka kecepatan tangensial fluida pada bagian dinding sama dengan 0.
- Komponen arah normal kecepatan fluida pada dinding sama dengan 0.
- Tegangan geser yang terjadi antara dinding dan fluida dapat ditentukan.

Apabila persamaan energi diaktifkan, maka pada dinding terdapat beberapa tipe fungsi kondisi termal (*Thermal Condition*) antara lain *heat flux*, temperatur, konveksi, dan radiasi. Dengan demikian dapat didefinisikan kondisi termal pada dinding tersebut dan fluida di sekitar dinding apakah dinding tersebut mengeluarkan *heat flux* tertentu, temperatur tertentu, penentuan koefisien konveksi fluida di sekitar dinding, dan pancaran radiasi dari dinding.

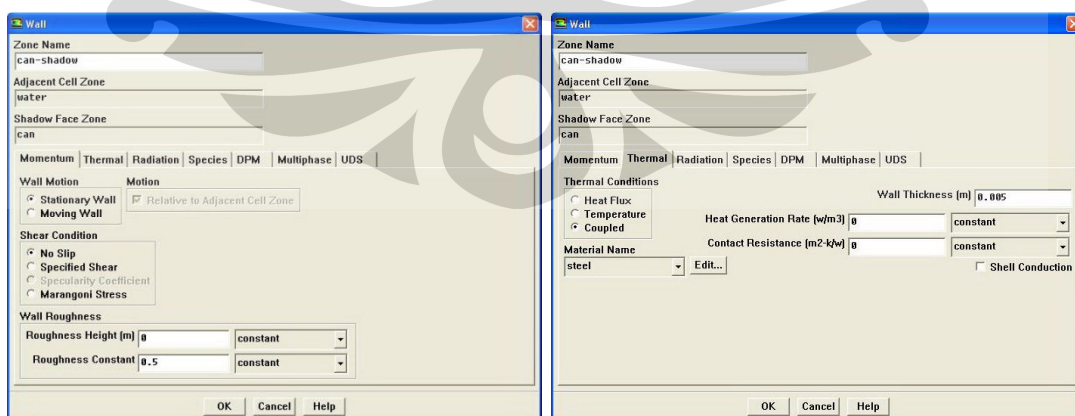
Kekasaran permukaan dinding dapat ditentukan apabila menggunakan model viskos turbulen. Dinding juga dapat dibuat bergerak secara translasi atau berputar dengan menentukan kecepatan putar atau translasi dinding. Kondisi dinding yang bergerak dibutuhkan apabila memodelkan aliran pada pompa, turbin atau khusus lain dengan menggunakan metode *moving reference frame*.

### 3.3.2. Can dan Can Shadow

Can & Can Shadow merupakan kondisi batas antara air dengan *brine* di mana dalam simulasi ini kondisi batas tersebut memiliki ketebalan 5 mm dengan jenis material steel. Fitur *shadow* ini akan otomatis muncul pada program *Fluent* apabila terdapat pembatas antara dua material, baik dalam bentuk padatan maupun cair. Fitur *shadow* ini juga diperlukan apabila ingin mendefinisikan terdapat perpindahan kalor antara satu material dengan material yang lain.



Gambar 3.19 Pendefinisian kondisi batas *can*



Gambar 3.20 Pendefinisian kondisi batas *can shadow*

### 3.3.3. Inlet

Inlet merupakan kondisi batas tempat masuknya *brine* yang telah didinginkan oleh evaporator. Untuk pengkondisian inlet ini digunakan kondisi batas *mass flow inlet*. Pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperatur fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan gage pada sisi masuk, arah aliran, dan besar turbulensi. Nilai tekanan gage tersebut sebenarnya hanya akan digunakan sebagai tebakan awal oleh *Fluent* dan akan dikoreksi sendiri sejalan dengan proses iterasi. Namun apabila nilai tekanan tersebut berbeda jauh dari keadaan sebenarnya maka akan memperlambat proses iterasi (butuh waktu yang lebih lama untuk konvergen).

Pada simulasi ini, nilai aliran massa yang digunakan adalah sebesar  $6,15 \text{ kg/s}$ . Nilai tersebut didapat dari perhitungan debit pompa yang digunakan saat ini.

$$Q_{pompa} = 19 \text{ m}^3/\text{s} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_{brine} = 1160 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\dot{m} = 5,3 \cdot 10^{-3}(1160) = 6,15 \text{ kg}/\text{s}$$

Aliran fluida diasumsikan tegak lurus dengan inlet dengan temperatur  $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Aliran fluida yang keluar dari inlet diasumsikan merupakan aliran turbulen. Asumsi ini didasarkan pada nilai bilangan *Reynold* pada inlet. Untuk menghitung nilai *Reynold* pada inlet, terlebih dahulu harus diketahui nilai kecepatan pada inlet. Untuk menghitung nilai kecepatan terlebih dahulu harus diketahui nilai luas penampang pada inlet. Dikarenakan luas penampang pada inlet berbentuk persegi panjang, maka harus diketahui nilai diameter hidrolis pada inlet. Dimensi pada inlet adalah panjang dengan nilai  $0,215 \text{ m}$  dan lebar  $0,46 \text{ m}$ .

$$D_h = \frac{2pl}{p+l} = \frac{2(0,215)(0,46)}{0,215+0,46} = 0,3 \text{ m}$$

$$A = \frac{1}{4}\pi D_h^2 = \frac{1}{4}\pi(0,3)^2 = 0,07 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{5,3 \cdot 10^{-3}}{0,07} = 0,08 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{1160(0,08)(0,3)}{0,0039} = 7138$$

Dari hasil perhitungan didapat nilai *Reynold* adalah sebesar 7138. Dikarenakan nilai *Reynold* lebih besar dari 4000, maka aliran pada inlet adalah aliran turbulen.

Pada simulasi ini, pemodelan turbulensi menggunakan model *realizable k-ε*. Model *realizable k-ε* merupakan pengembangan model yang relatif baru. Pada model *realizable k-ε* terdapat formulasi baru viskositas turbulen. Selain itu persamaan untuk laju disipasi ( $\epsilon$ ) telah diturunkan dari persamaan untuk menghitung fluktuasi viskositas rata-rata.

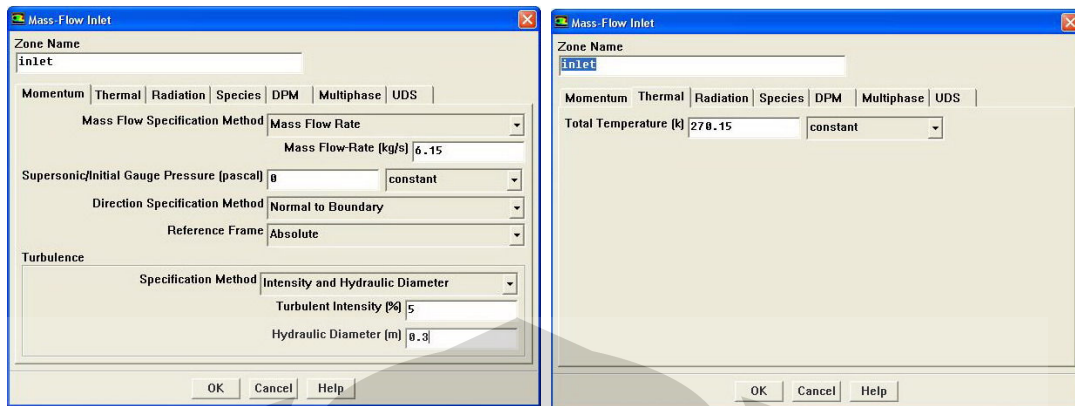
Istilah “*realizable*” mempunyai arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan *Reynold*, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Kelebihan dari *realizable k-ε* adalah lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran jet/ nosel. Model ini juga memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang mempunyai gradient tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi.

Salah satu keterbatasan model *realizable k-ε* adalah memproduksi viskositas turbulen non-fisik pada khusus di mana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (*multiple reference frame, sliding mesh*). Oleh karena itu penggunaan model ini pada khusus *reference frame* dan *sliding mesh* harus lebih berhati-hati.

Data yang harus dimasukkan untuk memodelkan turbulensi ini adalah intensitas turbulen dan diameter hidrolis. Nilai intensitas turbulen di dapat melalui perhitungan di bawah ini.

$$I = 0,16(Re)^{-1/8} = 0,16(7138)^{-1/8} = 0,05 = 5\%$$





Gambar 3.21 Pendefinisian kondisi batas *inlet*

### 3.3.4. Outlet

Outlet merupakan kondisi batas tempat keluarnya *brine* dari bak yang berisi can. Temperatur *brine* pada outlet akan lebih besar dibandingkan dengan Temperatur inlet karena telah mengalami proses perpindahan kalor dari air yang ada di dalam can. Kondisi batas yang digunakan untuk mendefinisikan outlet ini adalah *outflow*.

Kondisi batas ini digunakan apabila data aliran pada sisi keluar tidak diketahui sama sekali. Data pada sisi keluar diekstrapolasi dari data yang ada pada aliran sebelum mencapai sisi keluar. Pada kondisi batas ini tidak perlu memasukan data apapun. Pada pengaturan *outflow* terdapat nilai *Flow Rate Weighting* (FRW) yang harus dimasukan nilainya. Nilai FRW hanya digunakan apabila sisi keluar aliran lebih dari satu saluran.. Oleh karena itu dapat ditentukan persentase aliran yang melewati saluran keluar tersebut. Penjumlahan FRW pada masing-masing saluran keluar harus bernilai 1. Dikarenakan hanya terdapat satu saluran keluar pada simulasi ini, maka nilai FRW yang dimasukan adalah 1.



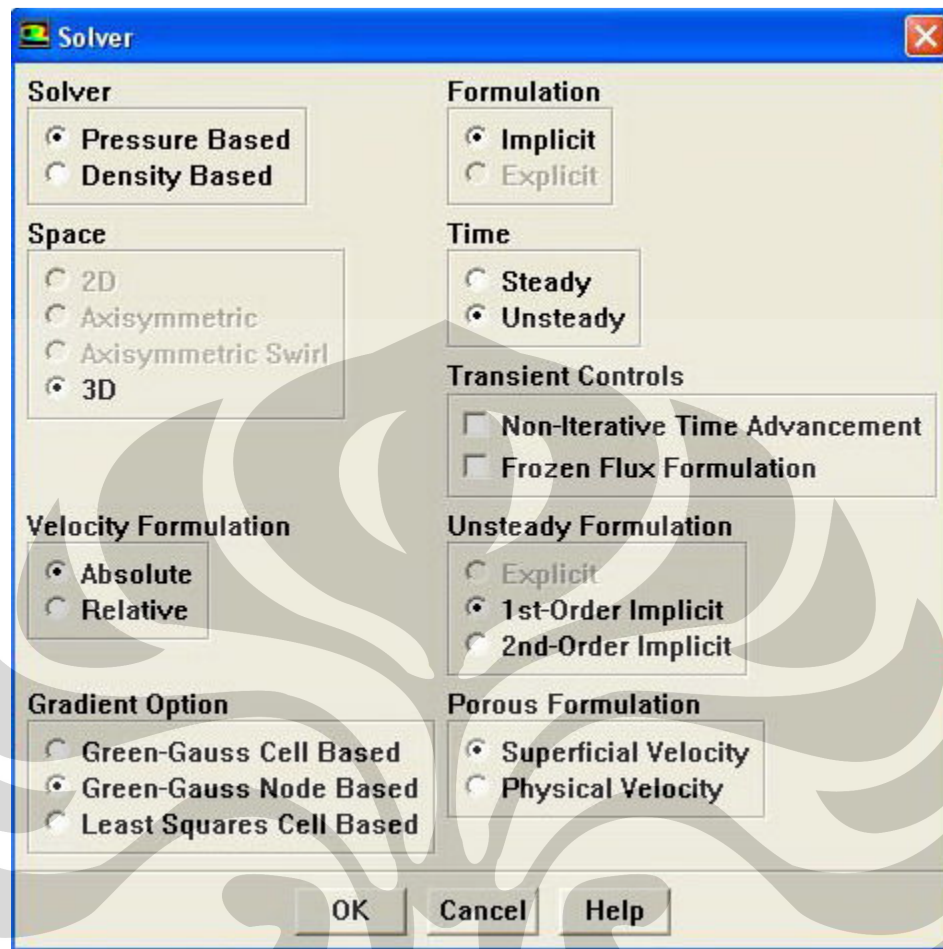
Gambar 3.22 Pendefinisian kondisi batas *Outlet*

### 3.4. SOLVER

Pada *Fluent* terdapat beberapa model dan persamaan dasar yang dapat dipilih sesuai dengan khusus yang akan dianalisa. Persamaan-persamaan tersebut meliputi:

- Model multi fasa
- Persamaan energi (*energy equation*)
- Model viskos
- Model spesies transport dan reaksi
- Model fasa diskrit (*discrete phase*)
- Model pembekuan dan peleburan (*solidification & melting*)
- Model akustik

Simulasi ini bertujuan untuk melihat proses pembekuan dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, pada pendefinisian solver, harus dipilih kondisi *unsteady* pada pilihan *time*. Pemilihan gradien yang digunakan pada simulasi ini adalah *green gauss node based*.



Gambar 3.23 Pendefinisian *Solver*

Pilihan model viskos yang ada pada *Fluent* dapat dipilih dari menu:

Define → Model → Viscous

Pada menu viskos terdapat beberapa pilihan, yaitu:

1. *Inviscid*
2. *Laminar*
3. *Spalart Allmars*
4. *k-epsilon*
5. *k-omega*
6. *Reynold Stress*
7. *Large Eddy Simulation*

Dikarenakan jenis aliran yang digunakan pada simulasi ini adalah turbulen, maka harus dipilih model aliran turbulen. *Fluent* menyediakan beberapa model turbulensi yaitu:

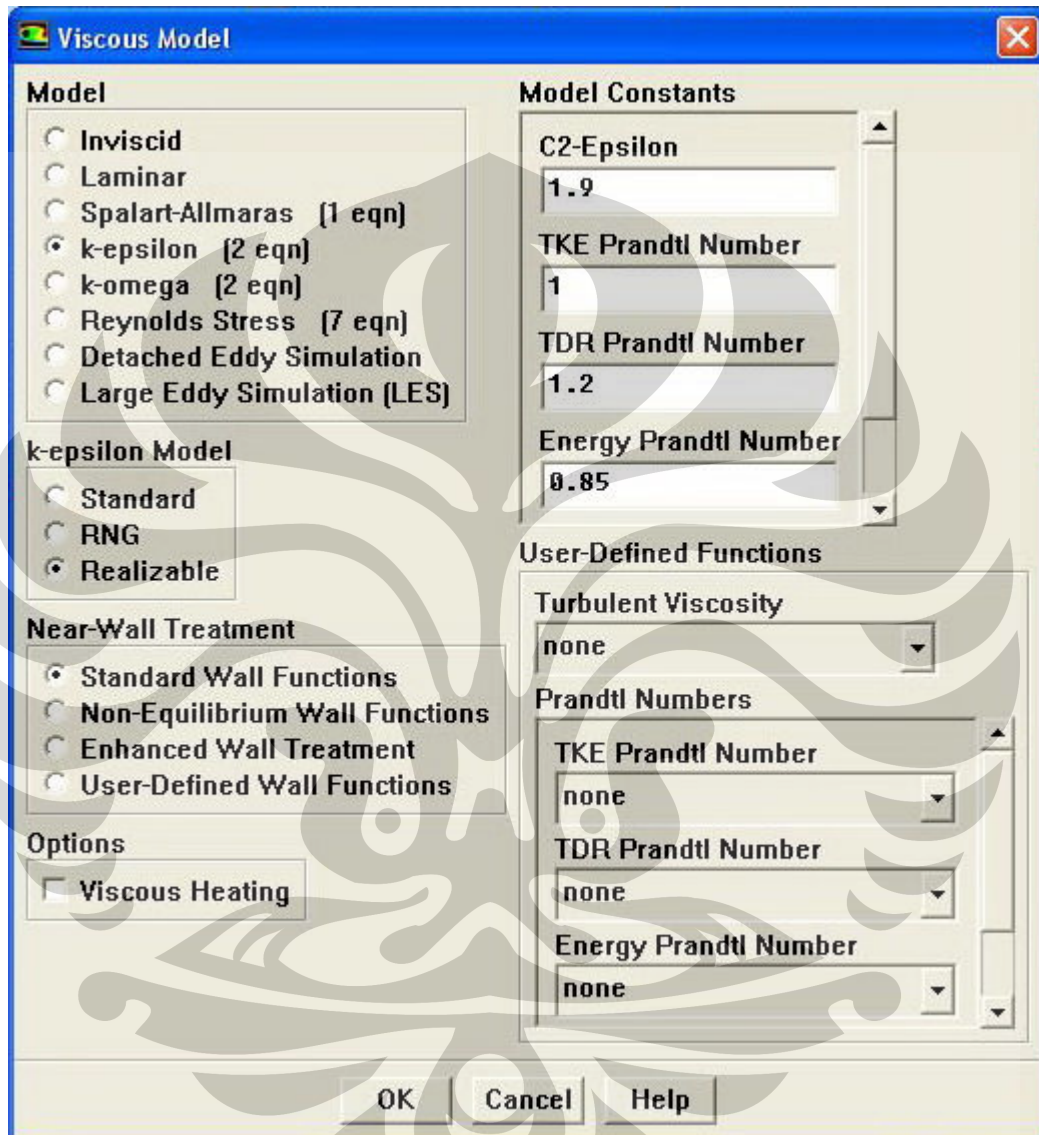
- Model *Spalart Allmars*
- Model  $k-\varepsilon$ 
  - *Standard  $k-\varepsilon$  model*
  - *Renormalization-group (RNG  $k-\varepsilon$  model)*
  - *Realizable  $k-\varepsilon$  model*
- Model  $k-\omega$  model
  - *Standard  $k-\omega$  model*
  - *Shear-stress transport (SST)  $k-\omega$  model*
- Model *Reynold Stress (RSM)*
- Model *Large Eddy Simulation (LES)*

Aliran turbulen dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan tersebut membawa berbagai besaran seperti momentum, energi, konsentrasi partikel, sehingga besaran tersebut juga ikut berfluktuasi. Fluktuasi tersebut dapat terjadi pada skala kecil dan mempunyai frekuensi yang tinggi, sehingga terlalu rumit dan berat untuk dihitung langsung pada perhitungan teknik praktis meskipun telah menggunakan computer yang canggih. Oleh karena itu persamaan yang berhubungan dapat dirata-ratakan (*time averaged, ensemble-averaged*) atau dimanipulasi untuk menghilangkan fluktuasi skala kecil. Dengan demikian persamaan-persamaan tersebut dapat lebih mudah untuk dipecahkan. Bagaimanapun juga, pada persamaan yang telah dimodifikasi tersebut terdapat tambahan variable yang tidak diketahui dan dibutuhkan mode turbulensi untuk menentukan variable-variabel tersebut.

Secara garis besar, model turbulen dapat didekati dengan menggunakan 2 pendekatan, yaitu:

1. Berdasarkan *Reynold Avaraged-Navier Strokes (RNS)*
2. Berdasarkan *Large Eddy Simulation (LES)*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pada simulasi ini digunakan model turbulensi *realizable k-ε*. Tujuan dari penggunaan model turbulensi *realizable k-ε* adalah untuk mendapatkan hasil aliran fluida yang lebih akurat.



Gambar 3.24 Pendefinisian model viskos

Pada simulasi ini akan menggunakan model pembekuan dan peleburan. *Fluent* dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan pembekuan dan/ atau peleburan yang terjadi pada satu temperatur tertentu. *Fluent* menggunakan formulasi entalpi-porositas untuk menyelesaikan model pembekuan dan peleburan. Daerah

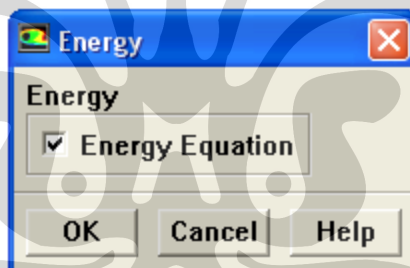
antara fasa cair dan padat diperlakukan sebagai suatu daerah berpori (*porous zone*) dengan porositas sama dengan fraksi fluida cair dan pada persamaan momentum dan turbulensi ditambahkan suatu besaran tambahan untuk menghitung penurunan tekanan karena adanya fasa padat yang terbentuk.

Untuk memodelkan proses pembekuan dan peleburan, maka model pembekuan dan peleburan harus diaktifkan. Gambar 3.28 menjelaskan pengaturan penyelesaian simulasi dengan melibatkan proses pembekuan dan peleburan.



Gambar 3.25 Pendefinisian model pembekuan dan peleburan

Apabila model pembekuan dan peleburan diaktifkan, maka persamaan energi otomatis akan diaktifkan.



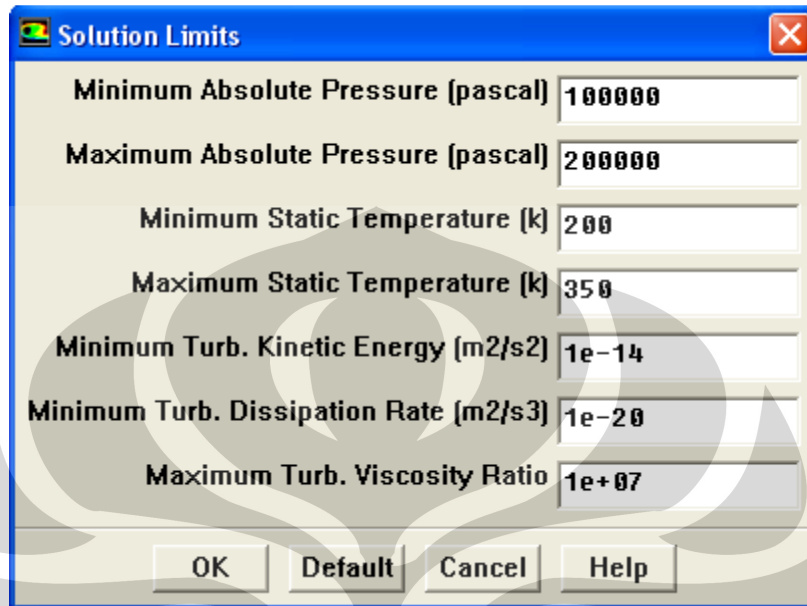
Gambar 3.26 Pendefinisian persamaan energi

### 3.5. LIMITASI

Limitasi merupakan prosedur pembatasan nilai yang akan dimasukkan dalam proses iterasi. Tujuan dari limitasi itu sendiri adalah untuk memperkecil range nilai yang akan diiterasi sehingga iterasi yang dilakukan tidak memakan waktu yang lebih lama. Gambar 3.30 menjelaskan pengaturan limitasi dalam simulasi ini dengan tekanan absolut minimum sebesar 100000 Pa, tekanan absolut maksimum sebesar 200000 Pa, temperatur statik minimum sebesar 250 K, temperatur statik maksimum sebesar 310 K, energi kinetik turbulen minimum sebesar  $1.10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}^2$ , rate disipasi

**Universitas Indonesia**

turbulen minimum sebesar  $1.10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}^3$ , dan rasio viskositas turbulen maksimum sebesar  $1.10^7$ .



Gambar 3.27 Pengaturan limitasi

### 3.6. ITERASI

Iterasi yang dilakukan pada simulasi perpindahan kalor secara transient dilakukan dengan memperhitungkan laju perpindahan kalor persatuan waktu. Simulasi ini bertujuan untuk melihat proses pembekuan tiap-tiap 4 jam. Pengaturan ini dapat dilakukan pada pengaturan iterasi.

## BAB 4

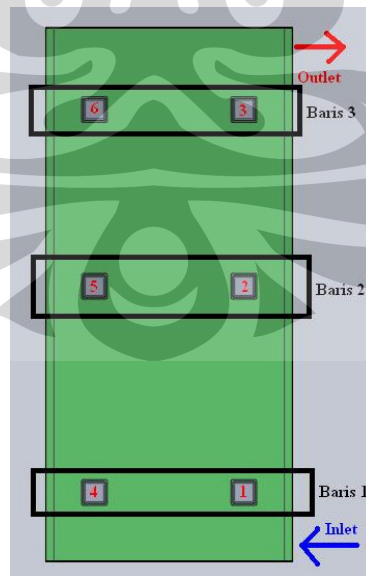
### HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Simulasi ini bertujuan untuk melihat laju pembekuan pada rentan waktu tertentu.. Hasil simulasi yang akan diperlihatkan adalah distribusi pembekuan pada air di dalam can, distribusi temperatur pada brine dan air di dalam can, dan distribusi aliran brine. Hasil pembekuan dibaca dengan melihat warna yang ada bagian tersebut. Warna yang menandakan besarnya fraksi liquid yang terbentuk pada area tersebut dengan warna biru yang menandakan fraksi liquid bernilai 0 sampai warna merah yang menandakan fraksi liquid bernilai 1. Fraksi liquid dengan nilai yang lebih rendah menandakan bahwa proses pembekuan yang berlangsung pada daerah tersebut telah berlangsung lebih dominan, begitu pula sebaliknya.

#### 4.1. HASIL SIMULASI PEMBEKUAN

##### 4.1.1. Hasil Simulasi Pembekuan pada Sumbu $y = 460$ mm

Pada hasil simulasi pembekuan ini akan diperlihatkan laju pembekuan setiap 4 jam. Laju pembekuan ini akan dilihat pada sumbu  $y = 460$  mm. Di bawah ini merupakan skema tampak atas dari geometri yang digunakan pada simulasi.

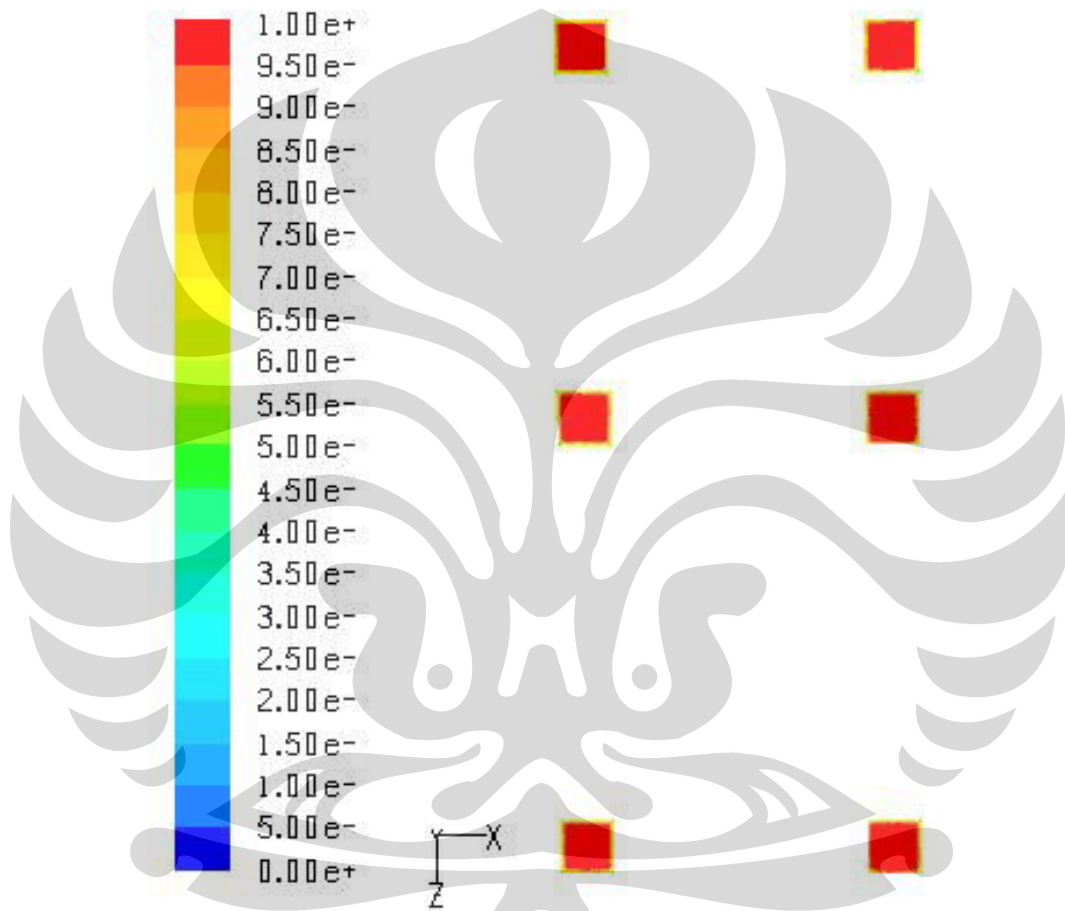


Gambar 4.1 Skema tampak atas *Mini Ice Plant*



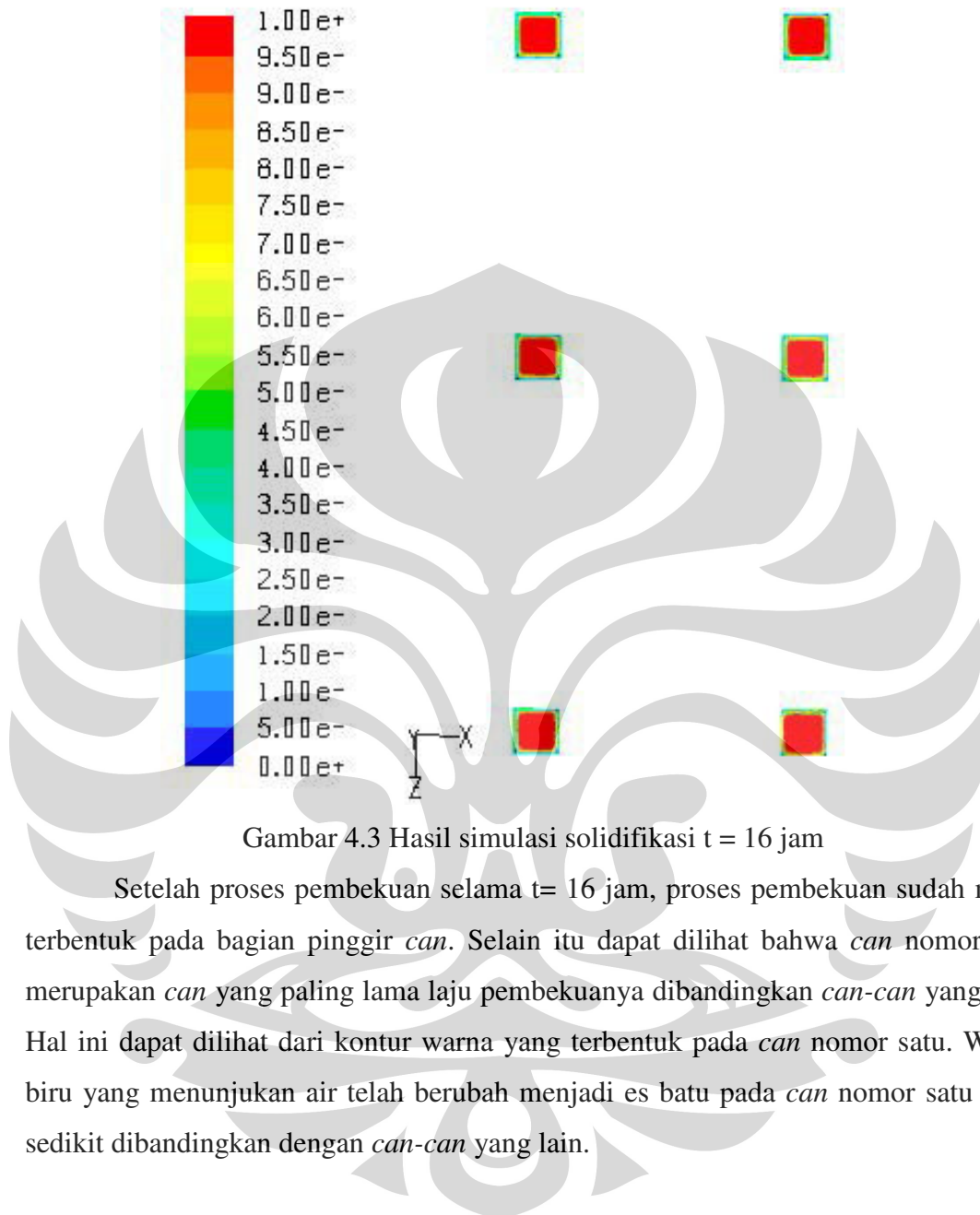
Pada simulasi ini menggunakan enam buah can dengan susunan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1. Susunan baris yang digunakan adalah sebanyak tiga baris sesuai yang ditunjukkan pada gambar 4.1.

Hasil simulasi ini bertujuan untuk melihat pada daerah mana proses pembekuan lebih dominan terjadi.



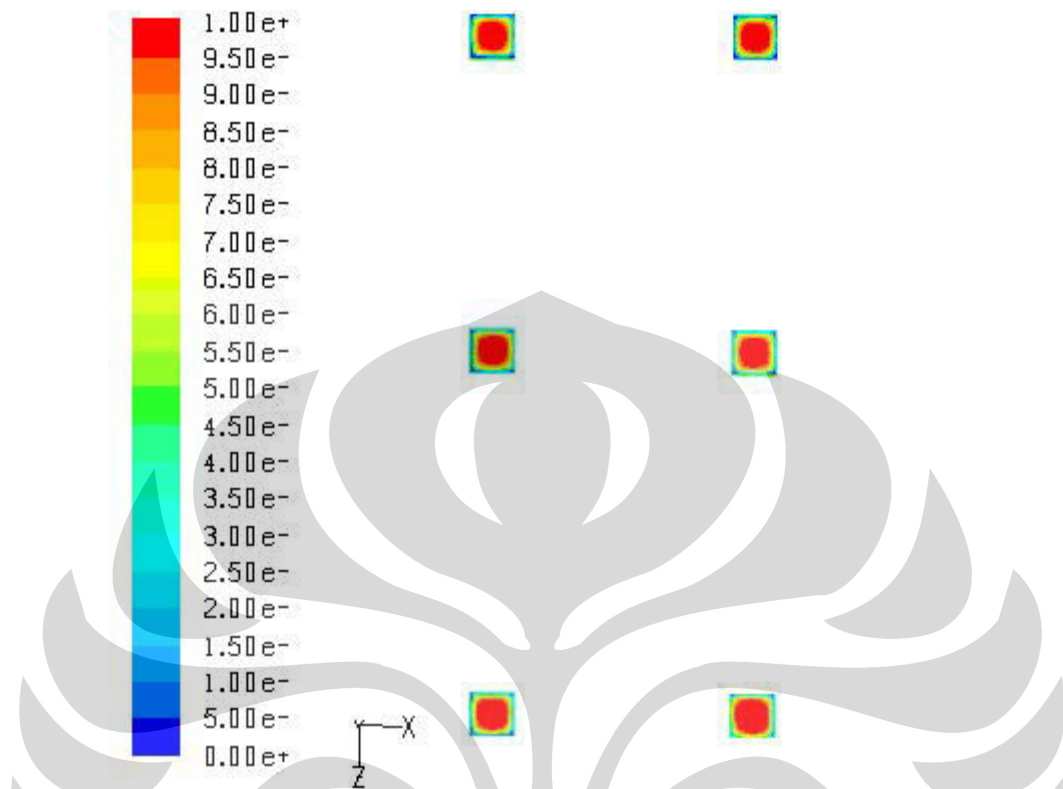
Gambar 4.2 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 4$  jam

Pada 4 jam pertama, bila dilihat pada sumbu  $y = 460$  mm, belum ada proses pembekuan yang terjadi pada air di dalam *can*. Hal ini dapat dilihat dari kontur warna pada hasil simulasi. Seluruh *can* yang ada masih berwarna merah yang menandakan air yang ada di dalam *can* belum terjadi proses pembekuan.



Gambar 4.3 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 16$  jam

Setelah proses pembekuan selama  $t = 16$  jam, proses pembekuan sudah mulai terbentuk pada bagian pinggir *can*. Selain itu dapat dilihat bahwa *can* nomor satu merupakan *can* yang paling lama laju pembekuannya dibandingkan *can-can* yang lain. Hal ini dapat dilihat dari kontur warna yang terbentuk pada *can* nomor satu. Warna biru yang menunjukkan air telah berubah menjadi es batu pada *can* nomor satu lebih sedikit dibandingkan dengan *can-can* yang lain.

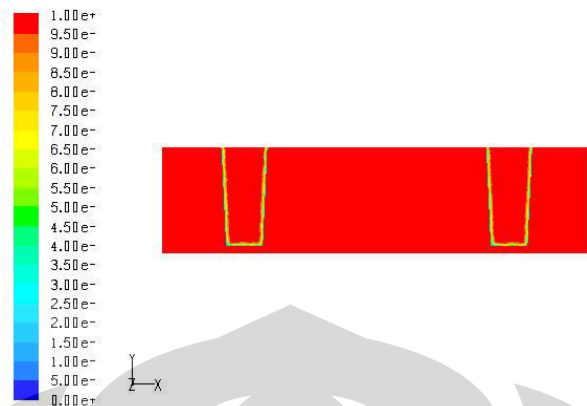


Gambar 4.4 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 32$  jam

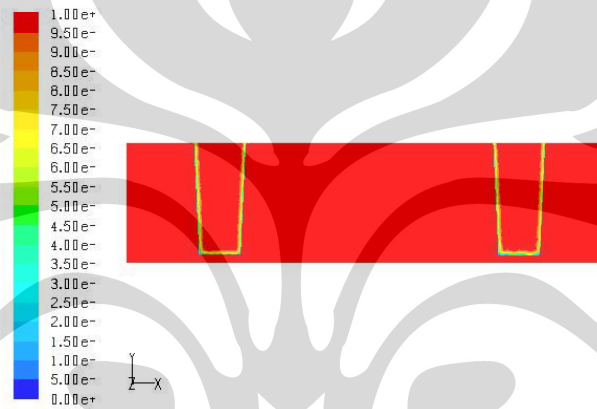
Pada  $t = 32$  jam, proses pembekuan pada bagian pinggir *can* semakin jelas terlihat. Selama  $t = 32$  jam, *can* nomor satu juga tetap merupakan *can* yang paling lama laju pembekuannya.

#### 4.1.2. Hasil Simulasi Pembekuan Tampak Samping

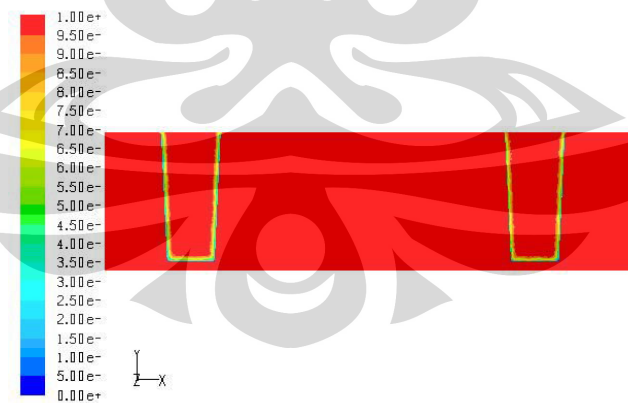
Pada hasil simulasi dari tampak samping ini akan memperlihatkan proses pembekuan pada tiap-tiap baris *can* yang ada. Hal ini bertujuan untuk memperlihatkan proses pembekuan yang terjadi dari bagian dasar *can* hingga ke bagian atas *can*. Pada simulasi kali ini pula dapat diperlihatkan apakah bagian bawah atau bagian atas *can* yang membeku terlebih dahulu.



Gambar 4.5 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 4$  jam pada baris ketiga

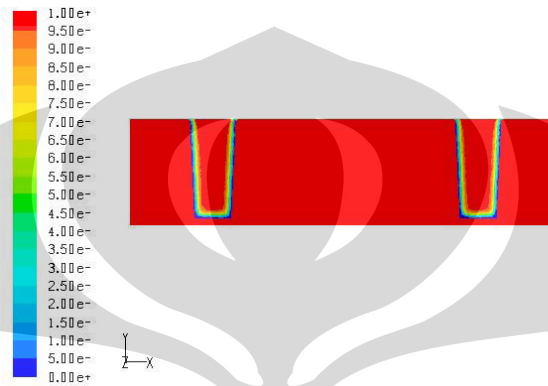


Gambar 4.6 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 4$  jam pada baris kedua

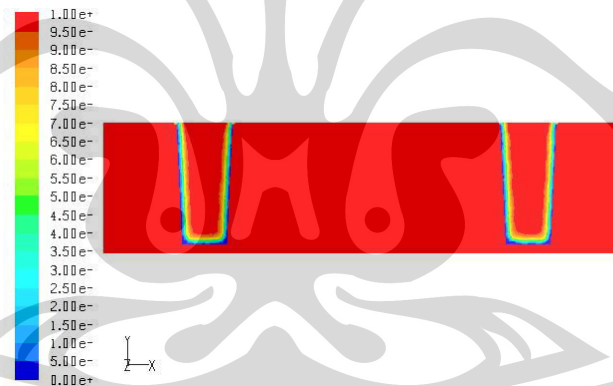


Gambar 4.7 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 4$  jam pada baris pertama

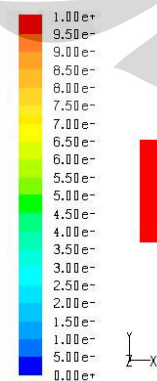
Pada hasil simulasi selama 4 jam, belum ada proses pembekuan yang terjadi pada baris pertama sampai ketiga. Namun dapat dilihat pada gambar di atas, air yang ada di bagian pinggir *can* sudah mulai berubah fase tetapi belum menjadi es batu. Hal ini dapat dilihat dari kontur warna yang ada belum menunjukkan nilai nol.



Gambar 4.8 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 16$  jam pada baris ketiga



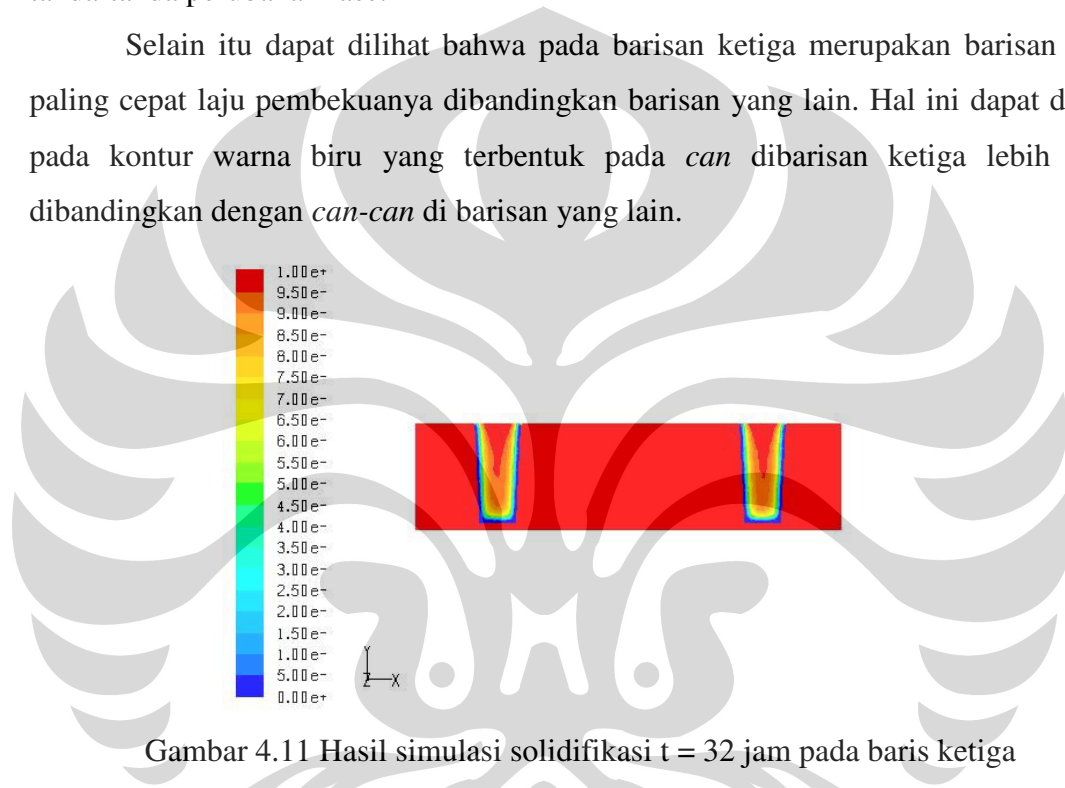
Gambar 4.9 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 16$  jam pada baris kedua



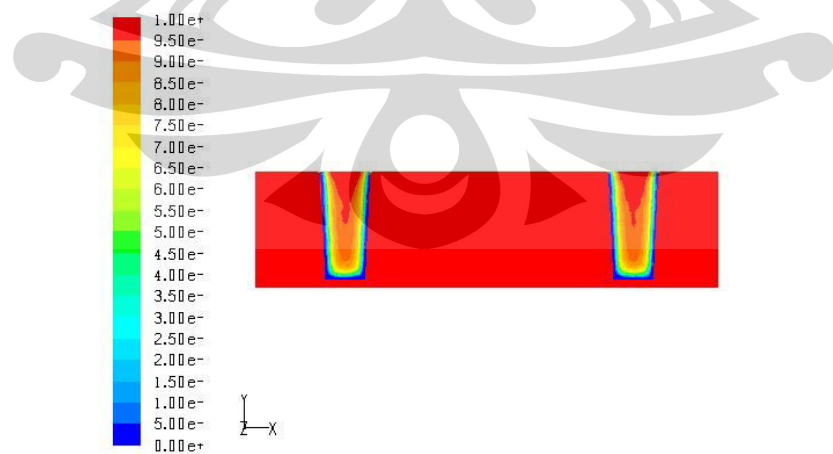
Gambar 4.10 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 16$  jam pada baris pertama

Pada proses pembekuan selama  $t = 16$  jam, proses pembekuan sudah mulai terjadi pada bagian pinggir dan bawah *can*. Hal ini menunjukkan bagian bawah *can* lebih cepat membeku dibandingkan dengan bagian atas *can*. Hal ini dapat dilihat selama  $t = 16$  jam, bagian atas *can* masih tetap berupa air dan belum memperlihatkan tanda-tanda perubahan fase.

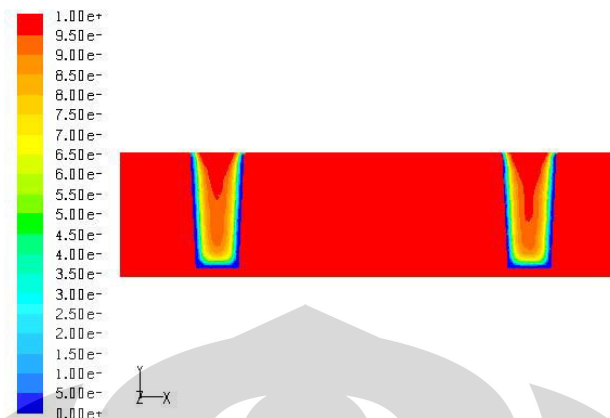
Selain itu dapat dilihat bahwa pada barisan ketiga merupakan barisan yang paling cepat laju pembekuannya dibandingkan barisan yang lain. Hal ini dapat dilihat pada kontur warna biru yang terbentuk pada *can* di barisan ketiga lebih tebal dibandingkan dengan *can-can* di barisan yang lain.



Gambar 4.11 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 32$  jam pada baris ketiga



Gambar 4.12 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 32$  jam pada baris kedua

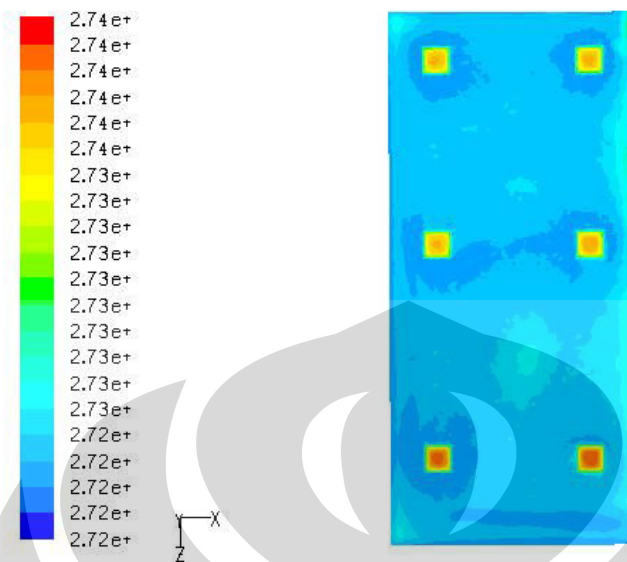


Gambar 4.13 Hasil simulasi solidifikasi  $t = 32$  jam pada baris pertama

Pada hasil simulasi selama  $t = 32$  jam, proses pembekuan lebih banyak terjadi. Selain itu pada hasil simulasi  $t = 32$  jam, dapat terlihat *can* nomor satu dan dua merupakan *can-can* yang laju pembekuannya lebih lama dibandingkan dengan *can-can* yang lain. Hal ini dapat terlihat dari kontur warna yang terbentuk. Kontur warna biru yang terbentuk pada *can* nomor satu dan dua lebih sedikit dibandingkan dengan *can-can* yang lain, sedangkan kontur warna merah yang terbentuk lebih banyak dibandingkan *can-can* yang lain.

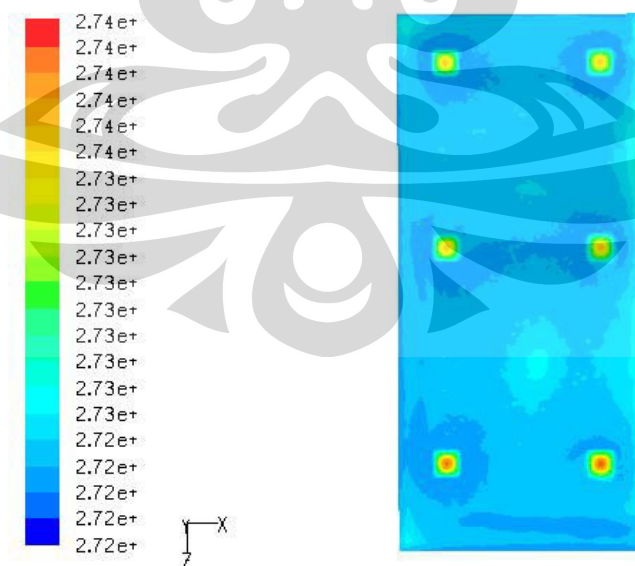
#### 4.2. HASIL SIMULASI DISTRIBUSI TEMPERATUR

Distribusi temperatur pada brine dapat menggambarkan proses perpindahan kalor yang terjadi antara brine dengan air. Gambar 4.14 menjelaskan bahwa pada saat  $t = 4$  jam temperature brine pada inlet adalah sekitar 272 K ( $-1^{\circ}\text{C}$ ) dan temperatur pada outlet sekitar 273 K ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Hal ini menandakan bahwa telah terjadi perpindahan kalor antara brine dengan air sehingga terjadi kenaikan temperature brine dan penurunan temperature air. Akibat perpindahan kalor, temperatur air yang sebelumnya sebesar 300 K ( $27^{\circ}\text{C}$ ) turun menjadi 273 K ( $0^{\circ}\text{C}$ ).



Gambar 4.14 Distribusi temperature pada  $t= 4$  jam

Gambar 4.15 merupakan gambar distribusi temperature pada  $t= 32$  jam. Dari gambar di bawah *can* nomor satu dan nomor empat merupakan *can* yang distribusi temperaturnya paling tinggi. Hal ini disebabkan karena *can* nomor satu dan empat merupakan *can* yang letaknya paling dekat dengan pintu masuk sehingga *can* nomor satu dan empat mempunyai dampak yang paling besar dari beban infiltrasi yan ada.

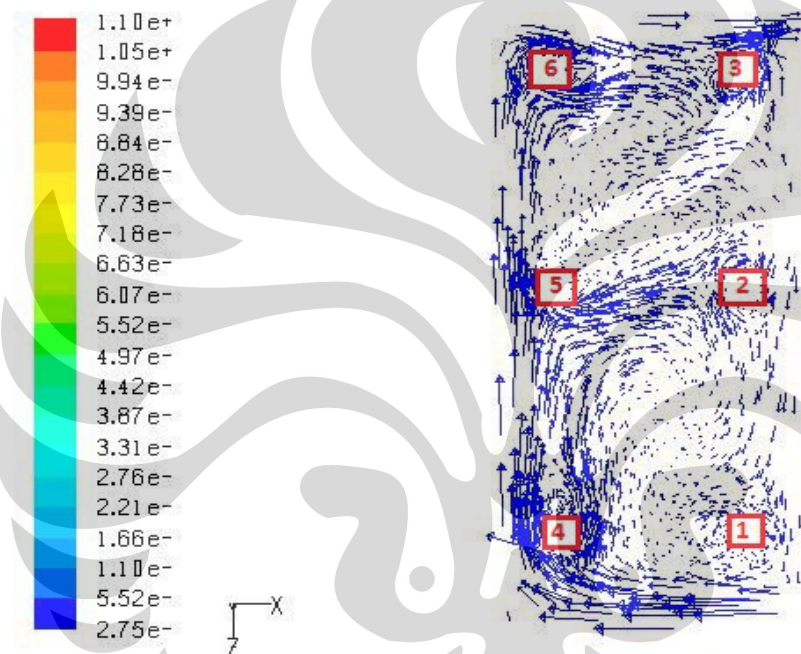


Gambar 4.15 Distribusi temperature pada  $t= 32$  jam



## 4.2. DISTRIBUSI ALIRAN BRINE

Distribusi aliran pada brine dapat mempengaruhi proses solidifikasi yang terjadi hal ini dikarenakan proses solidifikasi bergantung pada proses konveksi kalor dari air didalam can menuju brine. Proses konveksi tersebut bergantung pada perbedaan temperatur antara air di dalam can dengan temperatur *brine* serta kecepatan dari aliran *brine* tersebut. Semakin cepat laju aliran *brine* semakin cepat pula laju konveksi yang terjadi.



Gambar 4.16 Distribusi aliran *brine*

Gambar 4.15 merupakan gambaran distribusi aliran *brine* yang ada. Dapat dilihat dari hasil simulasi, *can* nomor satu dan dua merupakan *can* yang lebih sedikit mendapat sirkulasi aliran *brine*. Hal ini yang menyebabkan *can* nomor satu dan dua mengalami laju pembekuan yang lebih lama.

Pada pembahasan sebelumnya, temperatur *can* nomor satu dan nomor empat memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan *can-can* yang lain. Namun bila dilihat dari laju pembekuan, *can* nomor empat memiliki laju pembekuan yang termasuk cepat meskipun terletak di dekat pintu masuk. Hal yang menyebabkan proses pembekuan di *can* nomor empat termasuk cepat disebabkan oleh distribusi

**Universitas Indonesia**

aliran *brine*. *Can* nomor empat mendapatkan sirkulasi aliran *brine* yang paling banyak. Hal ini yang menyebabkan *can* nomor empat mempunyai laju pembekuan yang termasuk cepat meskipun terletak di dekat pintu masuk.



## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. KESIMPULAN**

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan menghasilkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Faktor geometri dari bak brine sangat berpengaruh terhadap laju aliran brine yang ada, hal ini dikarenakan faktor geometri yang ada mempengaruhi minor losses yang terbentuk.
2. Kecepatan aliran brine mempengaruhi besar kecilnya laju solidifikasi hal ini disebabkan oleh koefisien konveksi yang tergantung pada kecepatan aliran tersebut.
3. Bagian sudut dari can cenderung mengalami solidifikasi lebih cepat dikarenakan lebih besarnya konduktivitas perpindahan kalor pada bagian tersebut.
4. Pemerataan laju solidifikasi sangatlah penting hal ini dikarenakan agar memudahkan pemanenan dari es batu yang sudah siap diambil.

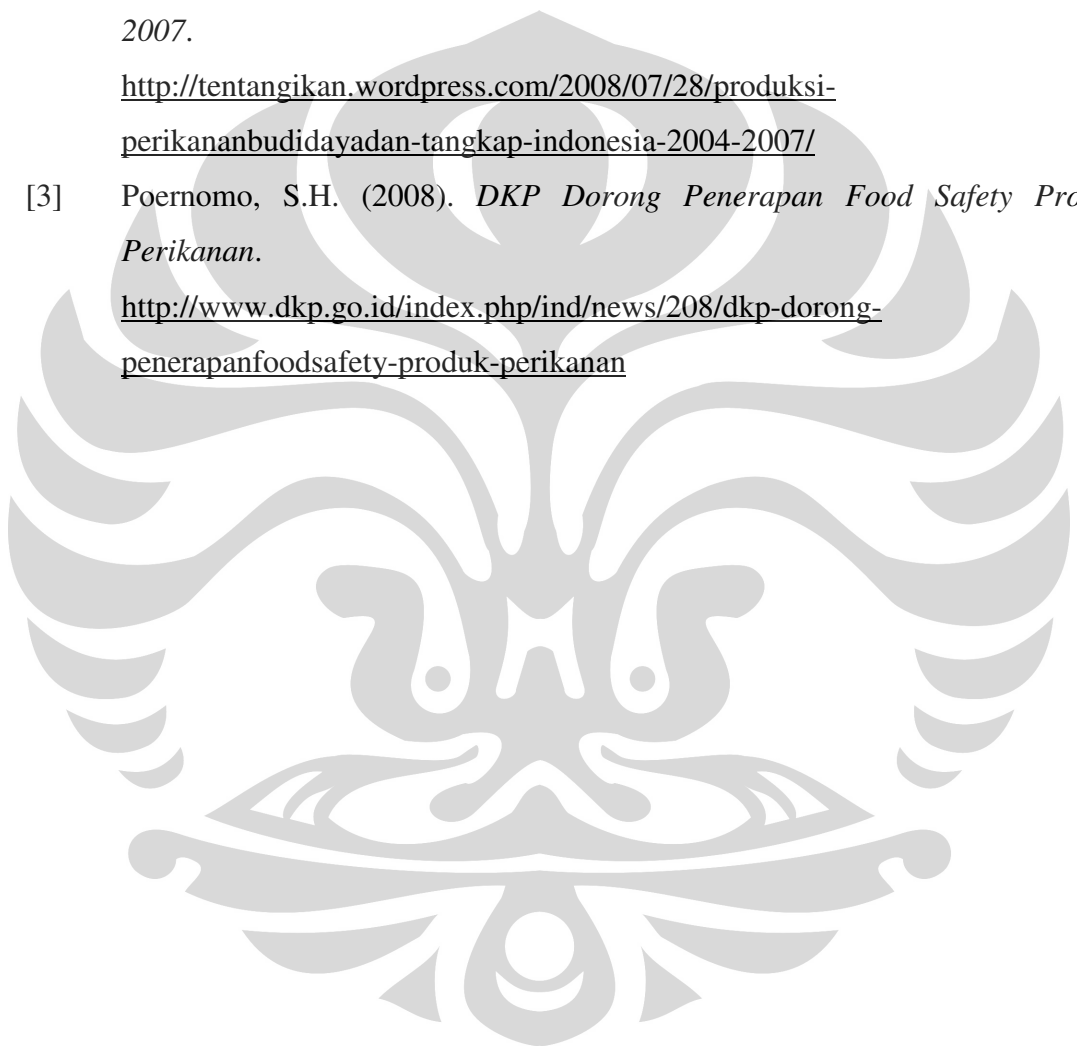
#### **5.2. SARAN**

Pada tugas akhir ini ada beberapa saran yang dapat disampaikan, di antaranya:

1. Untuk pemerataan laju solidifikasi perlu dibuat sudu pengarah aliran brine agar aliran yang terjadi cenderung seragam.
2. Perlunya untuk menentukan seberapa lama waktu solidifikasi yang diharapkan, hal ini untuk mengurangi beban dari mesin pendingin, disamping untuk meminimalisir inventory yang diperlukan untuk penyimpanan es batu.
3. Perlunya untuk mencoba beberapa simulasi dengan fraksi massa dari NaCl yang berbeda-beda hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar laju perpindahan kalor yang terjadi pada setiap fraksi massa, dan untuk melakukan efisiensi dari penggunaan NaCl yang diperlukan.

## DAFTAR KUTIPAN

- [1] Pujiyati, Sri (2001). *Pembangunan Perikanan Laut Di Indonesia*. Makalah Falsafah Sains. Program Pasca Sarjana/S3 Institut Pertanian Bogor.  
[http://tumoutou.net/3\\_sem1\\_012/sri\\_pujiyati.htm](http://tumoutou.net/3_sem1_012/sri_pujiyati.htm)
- [2] Ferinaldy (2008). *Produksi Perikanan Budidaya dan Tangkap Indonesia 2004-2007*.  
<http://tentangikan.wordpress.com/2008/07/28/produksi-perikananbudidayadan-tangkap-indonesia-2004-2007/>
- [3] Poernomo, S.H. (2008). *DKP Dorong Penerapan Food Safety Produk Perikanan*.  
<http://www.dkp.go.id/index.php/ind/news/208/dkp-dorong-penerapanfoodsafety-produk-perikanan>



## DAFTAR PUSTAKA

1. [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)
2. [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
3. Holman, J.P. Perpindahan Kalor , 1986.
4. Fluent User Guide, 2005. Chapter 25 Solidification & Melting.
5. ASHRAE Handbook, 2006. Chapter 5 Refrigeration
6. Musthopa , Azis . Perancangan dan Simulasi *Containerized Block Ice Plant*. Skripsi 2007. Depok. Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
7. Adhiwena, Ivan . Pengukuran dan Analisa Distribusi Temperatur pada *Ice Bank* untuk Optimasi Pengembangan *Mini Ice Plant*. Skripsi 2008. Depok. Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
8. P, Agus. Simulasi Solidifikasi pada *Mini Ice Plant*. Skripsi 2009. Depok. Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
9. Trot, A.R., & Welch, T. (3th ed.). (2000). *Refrigeration and Air-Conditioning*. Woburn: Butterworth-Heinemann

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

Tabel Data Properti Air

Temperature - $t$ -	Absolute pressure - $p$ -	Dynamic viscosity - $\mu$ -	Kinematic viscosity - $\nu$ -	Expansion coefficient	Specific enthalpy	Prandtl's no.
(°C)	(kN/m <sup>2</sup> )	(Centipoise)	10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	10 <sup>-3</sup> (1/ K)	(kJ/kg)	
0.01	0.6	1.78	1.792	-0.07	0	13.67
5	0.9	1.52		0.160	21.0	
10	1.2	1.31	1.304	0.088	41.9	9.47
15	1.7	1.14		0.151	62.9	
20	2.3	1.00	1.004	0.207	83.8	7.01
25	3.2	0.890		0.257	104.8	
30	4.3	0.798	0.801	0.303	125.7	5.43
35	5.6	0.719		0.345	146.7	

## Lampiran 2

Tabel Data Properti Es

<u>Temperature</u> - $t$ -	<u>Density</u> - $\rho$ -	<u>Thermal Conductivity</u> - $k$ -	<u>Specific Heat</u> - $c_p$ -
(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(W/mK)	(kJ/kgK)
0.01 ( <u>Water</u> )	999.8		
0	916.2	2.22	2.050
-5	917.5	2.25	2.027
-10	918.9	2.30	2.000
-15	919.4	2.34	1.972
-20	919.4	2.39	1.943