

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Teori Termodinamika

Termodinamika adalah proses yang terjadi pada suatu sistem dengan menghubungkan variabel energi fisika, panas, kerja dan entropi. Kerja dan panas dapat diukur hanya pada pembatas sistem dan jumlah energi yang dipindahkan tergantung pada cara terjadinya perubahan. Tekanan, suhu, kalor spesifik, entalpi dan entropi merupakan variabel dalam termodinamika antara lain:

- Suhu adalah suatu keadaan yang menyatakan keadaan termal dan kemampuan untuk menukarkan energi pada fluida dengan bahan sebagai media yang bersentuhan langsung dengannya. Suhu absolut adalah suhu yang dinyatakan dengan satuan kelvin ($^{\circ}K$) yang menunjukkan diatas suhu nol absolut.
- Tekanan adalah gaya normal yang diberikan pada fluida terhadap suatu ruang yang berdasarkan luas bidang tekan. Tekanan absolut merupakan ukuran parameter tekanan yang berada diposisi nol pada tekanan keadaan sesungguhnya.
- Kalor spesifik merupakan jumlah energi pada masa yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu yang menggunakan satuan sebesar $1^{\circ}K$. Volume tetap dan tekanan tetap merupakan besaran umum.
- Entropi adalah energi yang dalam sistem persatuan temperatur yang tidak dapat di pakai untuk usaha. Sistem ini memiliki 2 karakteristik, yaitu: jika gas atau uap diberi tekanan atau di ekspansikan tanpa adanya gaya gesek dan tanpa tambahan atau pelepasan kalor selama proses pelepasan kalor berlangsung, maka entropi tersebut dinyatakan tetap, dan dalam proses yang disebutkan sebelumnya perubahan entalpi menyatakan jumlah kerja persatuan massa yang di butuhkan oleh proses penakan atau dilepaskan dalam proses ekspansi tersebut.

- Entalpi adalah jumlah energi pada sistem termodinamika yang dilepaskan dalam persatuan massa. Pada total entalpi tidak dapat langsung diukur. Entalpi dinyatakan dalam potensial termodinamika, dari itu untuk mengukur entalpi suatu sistem, perlu ditentukan titik acuan sebagai pengukuran, baru kemudian dapat mengukur perubahan entalpi ΔH . Perubahan ΔH bernilai positif dalam reaksi endoterm dan negatif untuk eksoterm.
- Kalor adalah suatu bentuk energi yang terjadi akibat perbedaan suhu yang di terima oleh suatu benda yang menyebabkan perbedaan benda berubah temperatur atau wujud bentuknya. Kalor adalah suatu jumlah panas yang diserap atau dilepaskan oleh suatu benda.

Dalam mempelajari proses termodinamika di mana satu variabel, seperti suhu, tekanan, atau volume, dll, diadakan tetap yang telah dijelaskan diatas. Selanjutnya, akan berguna untuk mengelompokkan proses-proses ini menjadi pasangan-pasangan, di mana setiap variabel tetap konstan adalah salah satu anggota dari pasangan konjugasi. Berikut istilah proses dalam termodinamika, yaitu:

- Proses isobarik: terjadi pada tekanan konstan
- Proses isokorik: terjadi pada volume konstan (disebut juga isometrik/isovolumetrik)
- Proses isotermal: terjadi pada suhu konstan
- Proses adiabatik: terjadi tanpa kehilangan atau perolehan energi sebagai panas
- Proses isentropik: proses adiabatik reversibel terjadi pada entropi konstan, tetapi proses fiktif idealisasi. Secara konseptual dimungkinkan untuk secara fisik melakukan proses yang mempertahankan entropi konstanta sistem, memungkinkan pembuangan panas yang dikontrol secara sistematis, dengan konduksi ke benda yang lebih dingin, untuk mengkompensasi entropi yang dihasilkan dalam sistem oleh kerja ireversibel yang dilakukan pada sistem. Seperti perilaku isentropik dari suatu proses tampaknya diperlukan ketika entropi sistem dianggap sebagai variabel bebas, misalnya ketika energi

dalam dianggap sebagai fungsi entropi dan volume sistem, variabel alami dari energi dalam seperti yang dipelajari oleh Gibbs.

- Proses isentalpik: terjadi pada entalpi konstan
- Proses isolasi: tidak ada materi atau energi (baik sebagai kerja maupun panas) yang dipindahkan ke dalam atau ke luar sistem

2.1.1 Kalor Sensibel Dan Kalor Laten

Kalor sensibel adalah energi kalor yang menyebabkan terjadinya naik dan turunnya temperatur dengan fasa yang tidak mengalami perubahan. Volume dan tekanan adalah variabel mikroskopik yang tidak mengalami perubahan saat terjadinya perpindahan kalor secara sensibel. Kalor sensibel dapat diukur menggunakan alat ukur termometer. Formula kalor sensibel dapat dinyatakan,yaitu:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

2. 1

Dengan :

- Q = energi kalor sensibel (J)
m = massa yang mengalami perubahan temperatur (Kg)
Cp = kalor jenis (J/Kg .°C)
 ΔT = perubahan temperature (°C)

Kalor laten adalah energi kalor yang dilepaskan atau diserap yang ada dalam sistem termodinamika. Selama proses konstan temperatur yang ditentukan dalam beberapa keadaan. Keadaan ysg dimaksud adalah kalor fusi (peleburan), kalor (penguapan) dan kalor (penyubliman). Formula kalor laten dapat dinyatakan,yaitu:

$$Q = m \cdot L$$

2. 2

7

Dengan :

Q = energi kalor laten (J)

m = massa yang mengalami perubahan wujud atau fasa (Kg)

L = kalor laten beku (J/Kg)

2.2 Refrigrasi

2.2.1 Pendahuluan Sistem Refrigrasi

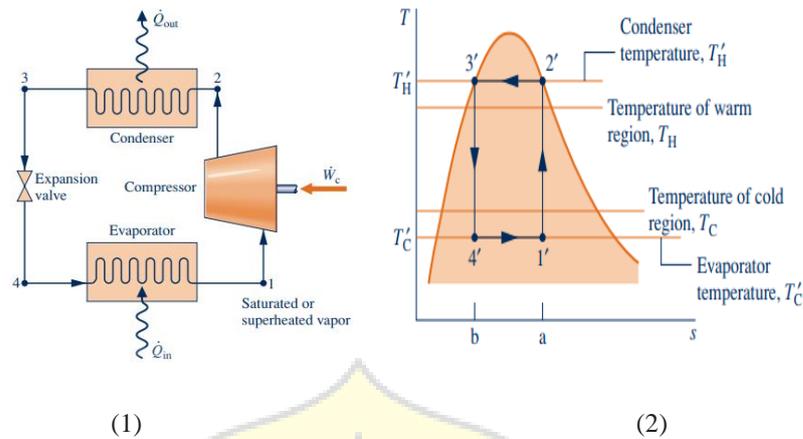
Pada eksperimen ini menggunakan sistem refrigrasi kompresi pada sistem pendingin yang di gunakan untuk membuat *ice slurry*. Definisi yang tepat dalam proses ini, yaitu energi panas yang dialirkan dari keadaan suhu tinggi menuju ke suhu rendah. Secara alami proses perpindahan panas ini tanpa memerlukan bantuan perangkat apapun. Pada sebaliknya proses ini tidak terjadi sendirinya diperlukan perangkat sistem refrigrasi.

Seorang ilmuwan bernama Olivier Evans (1755-1819) yang berasal dari amerika telah membuat desain sistem refrigrasi dengan menggunakan dasar sistem kompresi uap. Namun desain ini tidak pernah di bangun. Pada tahun 1834 sistem refrigrasi uap dibuat *prototype* dan dipatenkan oleh Jacob Perkins penemu dari amerika yang merupakan ilmuwan dalam bidang mekanik dan fisika, lalu ia dinobatkan sebagai bapak refrigrasi karena kontribusinya dalam dunia refrigrasi. Namun sistem kompresi ini memiliki kekurangan dalam hal refrigeran yang terbatas dalam mendapatkannya. Ammonia sebagai bahan *refrigerant* dalam sistem mempunyai kendingan bahan yang tidak ramah lingkungan. Menurut Helmi (2012) sistem ini tidak populer setelah ditemukan kompressor dan *refrigerant* kimia,

2.2.2 Siklus Refrigrasi

Dalam sistem refrigrasi kompresi yang bertujuan untuk menyerap kalor yang berada di lingkungan evaporator. Kemampuan evaporator sangat berpengaruh dari laju perpindahan kalor yang diserap oleh refrigeran. Pada dasarnya proses penyerapan kalor tergantung pada waktu atau disebut sebagai unsteady state yang

artinya waktu sangat berpengaruh pada proses pendinginan. Pada sistem refrigrasi kompresi terdapat 4 proses, antara lain:



(Sumber : Michael J. Moran | Howard N. Shapiro | Daisie D. Boettner | Margaret B. Bailey, Fundamental of Engineering Thermodynamics ed-8)

Gambar 2. 1 (1) siklus refrigrasi kompresi dan (2) Diagram T-S

- 1-2 adalah kompresor dengan proses isentropik
- 2-3 adalah kondensor dengan proses isobarik
- 3-4 adalah katup ekspansi dengan proses isoenthalpi
- 4-1 adalah evaporator dengan proses isobarik

Pada sistem refrigrasi kompresi memiliki komponen utama, yaitu: kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Refrigeran merupakan komponen terpenting dalam melakukan proses sistem ini, karena berfungsi sebagai zat yang melakukan penyerapan kalor sehingga mengalami penguapan dalam bekerjanya seiring bertambahnya temperatur. Berikut pembahasan masing-masing komponen yang ada dalam sistem refrigrasi kompresi, yaitu :

1. Kompresor

Kompresor berfungsi untuk mengkompresi *refrigerant* sehingga terjadi kenaikan tekanan dan temperatur dengan proses isentropik. Jenis fluida kerja yang di kompresi adalah gas. Apabila ada fluida cair selain gas yang memasuki kompresor akan terjadi kerusakan dan berdampak pada kinerjanya.

2. Kondensor

Kondensor merupakan media perpindahan panas yang berfungsi untuk mengubah tekanan gas pada refrigeran yang tinggi menjadi cairan yang bertekanan tinggi dengan proses isobar. Kondensor terdapat kipas dan kisi-kisi sebagai alat yang

3. Evaporator

Evaporator berfungsi sebagai pendinginan, dimana refrigeran yang mengalir pada evaporator berupa fasa gas bertekanan rendah setelah fasa cair bertekanan tinggi diberikan ekspansi. Kemudian kompresor bekerja menghisap gas refrigeran pada evaporator sehingga membuat keadaan tekanan di evaporator menjadi sangat rendah. Pada penelitian ini evaporator di desain dalam keadaan terinsulasi yang bertujuan untuk mendinginkan air laut yang berfungsi sebagai *secondary fluid*.

4. Coefisien Of Performance (COP)

Pada sistem termodinamika memiliki efisiensi terhadap daya masuk dan hasil yang di peroleh. Besarnya efektifitas performa kalor yang dapat diserap dalam sistem refrigrasi disebut dengan *Coefisien Of Performance (COP)*. Formula *COP* dapat dinyatakan, yaitu:

$$COP = \frac{Q_{in}}{w_c} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

2.3

Dengan :

COP = Coefisien Of Performance

Q_{in} = kalor yang di serap evaporator (Watt)

h_1 = entalpi *refrigerant* keluar evaporator (Kj/Kg)

h_4 = entalpi *refrigerant* masuk evaporator (Kj/kKg)

w_c = Daya kerja kompresor (Watt)

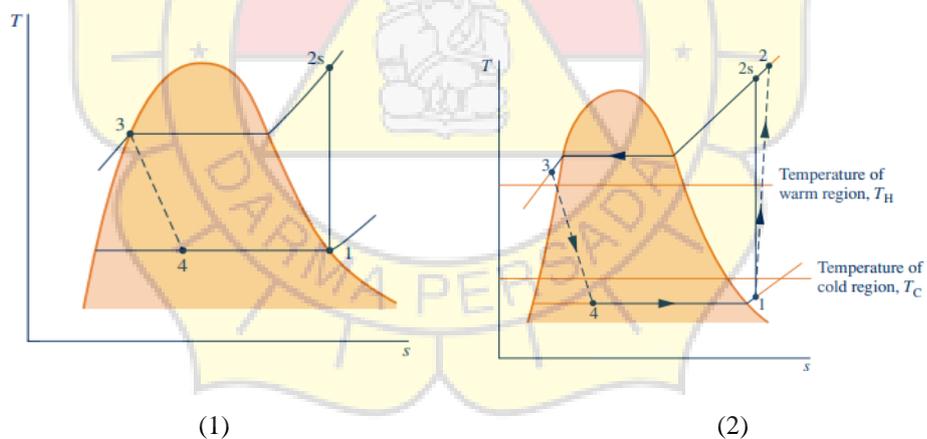
h_1 = entalpi *refrigerant* masuk kompresor (Kj/Kg)

h_2 = entalpi *refrigerant* keluar kompresor (Kj/Kg)

2.2.3 Performa Siklus Uap Aktual dan ideal

Pada siklus aktual perpindahan panas antara *refrigerant* menuju suhu rendah tidak tercapai. Suhu *refrigerant* didalam evaporator lebih rendah dibanding suhu dingin lingkungan dan suhu *refrigerant* pada kondensor lebih besar dari suhu panas lingkungan. Perpindahan panas yang tak dapat diubah tersebut memiliki pengaruh pada kinerja sistem pendingin.

Pada siklus ideal tidak ada penurunan tekanan, gesekan dan *refrigerant* mengalir dengan pada tekanan konstan. Jadi, nilai *COP* pada siklus ideal dan aktual memiliki perbedaan yang sangat signifikan.



(Sumber: Michael J. Moran | Howard N. Shapiro | Daisie D. Boettner | Margaret B. Bailey,
Fundamental of Engineering Thermodynamics ed-8)

Gambar 2. 2 (1) siklus aktual dan (2) siklus ideal

2.3 Refrigeran

Refrigeran di definisikan sebagai zat apapun yang berfungsi sebagai zat yang menyerap kalor pada lingkungan evaporator melalui ekspansi atau penguapan dan kehilangan kalor pada proses kondensasi dalam sistem pendingin. senyawa alokarbon. Pada tahun 1928, Charles Kettingen dan Dr. Thomas Mighey di ventilasi dan mengembangkan kelompok refrigeran ini Dalam kelompok ini termasuk zat pendingin yang mengandung satu atau lebih dari tiga halogen, klorin dan bromin dan dijual di pasaran di bawah nama-nama sebagai *Freon*, *Genetron*, *Isotron*, dan *Areton* (R.K Rajput).

Refrigeran yang mengandung *HCFC* (*Hydrochloroflourocarbon*) dan *CFC* (*Klorofluorokarbon*) terdapat banyak kekurangan yang berdampak terhadap lingkungan seperti merusak lapisan ozon dan dapat menimbulkan pemanasan global. Menanggapi hal ini, telah beberapa kali diadakan kesepakatan Internasional yang berusaha menghapuskan penggunaan *HCFC* dan *CFC*. Di Indonesia melalui keputusan Menperindag No:110/MPP/kep/1998 mengeluarkan larangan memproduksi dan memperdagangkan bahan perusak lapisan ozon. Dalam hal ini termasuk *refrigerant* 12 dan R-22. Oleh karena itu diperlukan adanya refrigeran pengganti. (Swisscontact, 1999). senyawa *HCFC* seperti refrigeran 404A yang merupakan refrigeran campuran (R-143a/125/134a). Dimana refrigeran ini tidak memiliki unsur *chlour* yang dapat merusak lapisan ozon dan nilai *ODP* (*Ozone Depletion Potensial*) sama dengan nol, proses pendinginan yang dihasilkan lebih baik, memiliki temperatur penguapan yang rendah sehingga cocok untuk penerapan pada sistem refrigrasi dan ramah lingkungan.

Tabel 2. 1 Physical Properties Freon 404A

<i>Chemical Formula</i>	<i>CHF₂CF₃/CH₃CF₃/CH₂FCF₃</i> (44/52/4% <i>by weight</i>)
<i>Molecular Weight</i>	97.60
<i>Boiling Point at One Atmosphere</i>	-46.45 °C (-51.62 °F)
<i>Critical Temperature, T_c</i>	72.07 °C (161.73 °F) 345.22 K (621.40 °R)
<i>Critical Pressure, P_c</i>	3731.5 kPa (abs) (541.2 psia)
<i>Critical Density, D_c</i>	484.5 kg/m ³ (30.23 lb/ft ³)
<i>Critical Volume, V_c</i>	0.00206 m ³ /kg (0.0331 ft ³ /lb)

2.4 *Ice slurry*

Sistem pendinginan pada awalnya menggunakan es atau salju ini berlaku hanya ada di daerah yang beriklim non tropis dan subtropis. Awalnya bertujuan hanya untuk mengawetkan makanan, tetapi berkembangnya zaman telah ditemukannya sistem pendingin yang sangat inovatif dan bernama *ice slurry* generator oleh perusahaan *sunwell technologies inc* di Kanada pada tahun 1976.

Ice slurry atau bubuk es adalah es dengan perubahan fase sekunder fluida yang terdiri dari bentuk cairan dan bentuk padat dengan fraksi tertentu. Menurut Peter W. Egolf dan Michael Kauffeld (2005) definisi *ice slurry* yang mendekati adalah :

- Bubuk es terdiri dari partikel es dalam larutan berair
- Bubuk es kristal halus adalah bubuk es dengan partikel es dengan diameter karakteristik rata-rata, yang sama atau lebih kecil dari 1 mm.

Pada dasarnya proses pembentukan *ice slurry* memerlukan penambahan zat aditif yang berfungsi untuk menurunkan titik beku, viskositas menambah nilai konduktivitas termal dan kalor pada fluida. Beberapa zat aditif yang dapat digunakan pada pembuatan *ice slurry* adalah *sodium chloride*, *ethanol*, *ethylene glycol*, *propylene glycol*, dan juga air laut.

Dalam proses pembentukan *ice slurry* atau pertumbuhannya memiliki beberapa tahapan sehingga menjadi bubuk es, antara lain:

- Supersaturasi, yaitu temperatur titik beku fluida dibawah temperatur titik beku air
- Nukleasi, yaitu ketika titik beku fluida telah mencapai yang akan timbul fraksi es
- Propagasi, yaitu pertumbuhan Kristal es



(Sumber: Nissin Refrigeration Engineering LTD.)

Gambar 2. 3 (1) *Ice slurry* dan (2) *Ice slurry* Diameter 0,1 mm Uji Visual Dengan Mikroskop

2.5 Prinsip kerja sistem *ice slurry*

Sistem kerja mesin *ice slurry* pada penelitian ini pada dasarnya sama dengan sistem refrigrasi pada umumnya, tetapi terdapat perbedaan pada *heat exchanger* pada bagian evaporatornya. Evaporator pada mesin *ice slurry* memiliki tugas khusus untuk menyerap kalor yang berada di lingkungan evaporator yang dialirkan fluida *refrigerant* dengan cara konduksi dan konveksi karena pada bagian luar evaporator memiliki dinding pembatas antara lilitan berbentuk coil pada pipa kapiler.

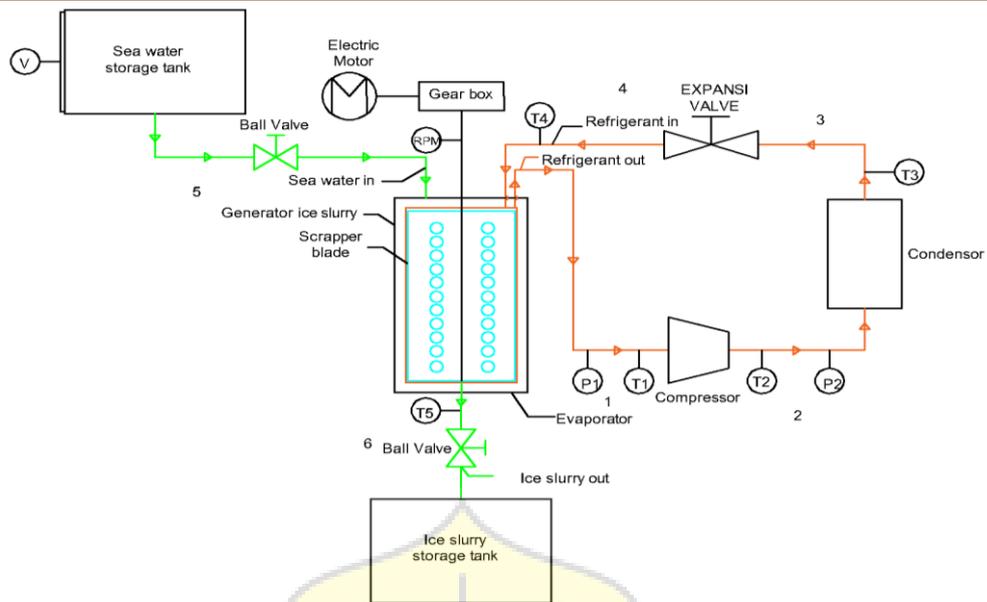
Media yang ingin didinginkan adalah air laut yang memiliki karakteristik salah satunya titik beku pada suhu tertentu yang akan menimbulkan fraksi es pada sisi dinding dalam evaporator. Maka dari itu diperlukannya penambahan komponen *scraper*. *Scraper* merupakan *shaft* yang terpasang blade pada sisinya yang berada pada bagian dalam evaporator yang berfungsi untuk mengikis penebalan lapisan es pada dinding tabung. Lubang- lubang pada *scraper* berfungsi untuk mengurangi

hambatan pada saat proses berputar. Berikut cara kerja sistem ice slury secara keseluruhan, yaitu:

- 1-2 uap refrigeran pada kompresor dikompresi. Hal ini bertujuan untuk menekan gas refrigeran yang bersuhu rendah dan bertekanan rendah menjadi yang bersuhu tinggi dan bertekanan tinggi.
- 2-3 perpindahan panas terjadi pada kondensor yang dilepaskan ke atmosfer. pada proses ini mengubah gas refrigeran menjadi cairan bertekanan tinggi bersuhu rendah.
- 3-4 proses ekspansi ini mengubah cairan panas bertekanan tinggi *refrigerant* menjadi fasa campuran gas dan cair bertekanan rendah dan bersuhu rendah.
- 4-1 pada evaporator terjadi penyerapan kalor air laut yang telah dimasukan pada no.5 oleh *refrigerant* berfasa campuran gas dan cair bertekanan rendah dan bersuhu rendah. Pada proses ini dilakukan secara terus menerus.
- 5-6 proses pengadukan air laut pada evaporator menggunakan *scraper shaft* yang diputar menggunakan motor listrik, lalu proses pengeluaran *ice slurry* yang telah terbentuk terlihat pada no 7 pada gambar 2.4.

Pada gambar 2.4 terdapat simbol sebagai titik pengukuran yang terdapat pada sistem ini. Berikut arti dari simbol tersebut, yaitu:

- T1 (temperatur setelah keluaran evaporator)
- T2 (temperatur setelah keluaran kompresor)
- T3 (temperatur setelah keluraan kondensor)
- T4 (temperatur setelah keluaran ekspansi)
- T5 (temperatur air pada tabung evaporator)
- P1 (*low pressure* keluaran evaporator)
- P2 (*high pressure* keluaran kompresor)
- RPM (putaran pada *shaft scraper*)
- V (volume tangki)



Gambar 2. 4 Skema Sistem *Ice Slurry*

Garis hijau= Pipa *sea water*

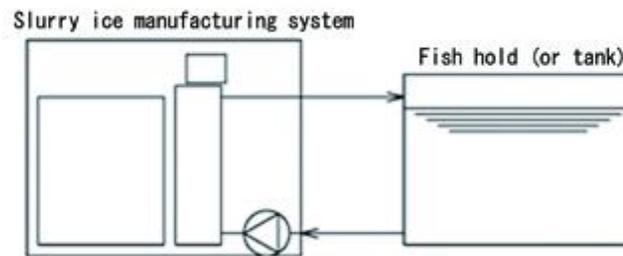
Garis oren= Pipa *refrigerant*

2.5.1 Sistem *ice slurry*

Pada sistem *ice slurry* terdapat 2 jenis sistem, yaitu *circulating ice making method* dan *direct method*. Dibawah ini merupakan penjelasan dari kedua sistem tersebut.

1. *Circulating ice making method*

Volume yang diperlukan dari cairan yang belum diproses disimpan dalam palka dingin (atau tangki), dan cairan yang belum diproses disirkulasikan antara palka dingin dan sistem pembuatan es bubuk untuk secara bertahap menyesuaikan konsentrasi es dengan konsentrasi yang diperlukan. Sistem manufaktur seringkali diperkecil ukurannya; jangka waktu tertentu diperlukan sampai konsentrasi es yang dibutuhkan tercapai. Saat memindahkan es bubuk setelah pembuatan, perangkat pencampur diperlukan di dalam *cold hatch*.

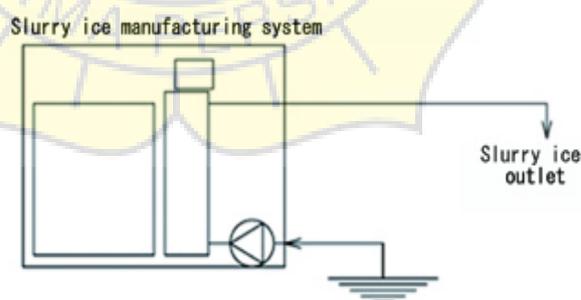


(Sumber: Nissin Refrigeration Engineering LTD.)

Gambar 2. 5 *Circulating ice making method*

2. *Direct method*

Es bubuk disesuaikan dengan konsentrasi es yang diperlukan setelah cairan yang belum diproses dikeluarkan dari sistem manufaktur. Pasokan es bubuk dari konsentrasi es yang dibutuhkan dapat dimulai dalam waktu singkat (sekitar 15 menit). Tergantung pada metode pengoperasiannya, *cold hatch* (atau tangki) untuk cairan yang belum diproses menjadi tidak diperlukan. Namun, sistem manufaktur seringkali lebih besar daripada metode sirkulasi. Namun, dengan terlebih dahulu mendinginkan brine yang akan disuplai, sistem produksi dapat dibuat lebih kecil atau volume suplai dapat ditingkatkan juga.



(Sumber: Nissin Refrigeration Engineering LTD.)

Gambar 2. 6 *Direct method*

2.6 Karakteristik Air Laut

Penggunaan air sebagai pembentukan *ice slurry* kurang baik dikarenakan kualitas es yang terbentuk berupa kristal dikarenakan titik beku pada air yang tinggi. Oleh karena itu dipenambahan zat pelarut dapat menghasilkan kualitas *ice slurry* yang baik dikarenakan titik beku yang rendah. Air laut, atau air asin adalah air dari laut atau samudra. Untuk rata-rata, air laut di lautan dunia memiliki salinitas 3,5% (35 g/L, atau 0,600 M) artinya setiap kilogram (kira-kira satu liter volume) atau air laut sekitar 35 gram (1,2 oz) garam terlarut (terutama natrium (Na⁺) dan klorida (Cl⁻) ion) (Gale). Air laut samudra seluruh dunia memiliki rata-rata titik beku -2°C.

Freezing point depression adalah proses dimana penambahan zat terlarut untuk pelarut agar dapat menurunkan titik beku pelarut. Fenomena inilah yang menyebabkan air laut untuk tetap cair pada suhu di bawah 0 ° C, titik beku air murni. Larutan dengan berat molekul rendah cenderung lebih efisien untuk *ice slurry*, karena sifat *thermophysical ice slurry* mengalami penurunan ketika ditambahkan zat terlarut dan aditif mengakibatkan penekanan pada titik beku larutan tersebut (Meewisse & Ferreira 2001). Feistel et al (2008) telah meneliti antara hubungan salinitas terhadap titik beku dari air laut.

Tabel 2. 2 Hubungan *freezing point temperatur* dengan salinitas air laut

Salinitas (ppt)	TemperaturBeku (°C)
5	- 0.269
10	- 0.536
15	- 0.803
20	- 1.074
25	- 1.348
30	- 1.625
35	- 1.908
40	- 2.195
45	- 2.487
50	- 2.784
55	- 3.087
60	- 3.396
65	- 3.711
70	- 4.033