



UNIVERSITAS INDONESIA

**UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY*
GENERATOR BERBAHAN DASAR AIR LAUT**

SKRIPSI

ARIEF SETIAWAN
07 06 26 691 6

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY*
GENERATOR BERBAHAN DASAR AIR LAUT**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

ARIEF SETIAWAN

07 06 26 691 6

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul:

UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY GENERATOR*

BERBAHAN DASAR AIR LAUT

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan tiruan atau duplikasi dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya. Penulisan tugas akhir ini dibuat bersama dengan Irawan Sentosa (0706166970) dengan judul tugas akhir “Estimasi Biaya Energi dan Perpindahan Kalor Pada Tangki *Ice Slurry Generator* Berbahan Dasar Air Laut” sehingga terdapat kata-kata atau kalimat yang sama.

Nama : Arief Setiawan

NPM : 0706266916

Tanda Tangan : 

Tanggal : 01 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Arief Setiawan
NPM : 0706266916
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI ICE
SLURRY GENERATOR BERBAHAN DASAR
AIR LAUT

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. Agus S Pamitran S.T., M.Eng.

(.....)

Penguji : Prof. Dr. -Ing. Ir. Nandy S Putra.

(.....)

Penguji : Dr. -Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng.

(.....)

Penguji : Ardiyansyah S.T., M.Eng.

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 01 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah dan nikmat-Nya karena penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Dalam penelitian ini, Penulis banyak menerima saran, bimbingan, bantuan dan informasi dari berbagai pihak, sehingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Untuk itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Orang tua penulis, Yahning, Makning, dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, semangat, dan doa, sampai penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
- (2) Bapak Dr. Agus Sunjarianto Pamitran S.T, M.Eng, selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak meluangkan waktu & tenaga dalam memberikan saran serta bimbingan.
- (3) Bapak Prof. Dr. -Ing. Ir. Nandy Putra, yang telah mengizinkan penulis memodifikasi dan melanjutkan penelitian mengenai *ice slurry generator*.
- (4) Bapak Dr. -Ing. Ir. Nasruddin, M.Eng, yang turut membantu memberikan saran dan dorongan yang penulis rasakan sangat besar manfaatnya dalam pengujian dan pengambilan data di laboratorium.
- (5) Pak Yul dan Pak Darwin yang banyak memberikan masukan dan saran.
- (6) Mas Udiyono, Mas Syarief, yang senantiasa membantu penulis di Laboratorium Refrigerasi Teknik Mesin Universitas Indonesia.
- (7) Irawan Sentosa selaku teman sekelompok yang telah berkerja sama dengan penulis selama penyusunan skripsi ini.
- (8) Rio, Novel, Ridwan, Riski, Eka, Freddy, Andre, Ricky, Lucky, Taufik, Farid, Ical, Bob, Zico, Jebi, Teguh, Hedri, Bayu, dan teman-teman lab lainnya yang sama-sama belajar dan berjuang menyelesaikan penelitian skripsi.

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

Depok, 01 Juli 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Arief Setiawan
NPM : 0706266916
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:

**UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY*
GENERATOR BERBAHAN DASAR AIR LAUT**

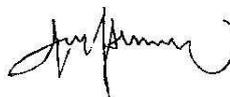
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 01 Juli 2011

Yang menyatakan



(Arief Setiawan)

ABSTRAK

Nama : Arief Setiawan
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : UNJUK KERJA SISTEM REFRIGERASI *ICE SLURRY*
GENERATOR BERBAHAN DASAR AIR LAUT

Indonesia merupakan negara bahari yang mampu menghasilkan ikan untuk konsumsi dalam jumlah besar. Keadaan ini berbanding terbalik dengan keadaan ekonomi masyarakat nelayan yang tergolong warga negara berekonomi lemah. Salah satu faktor yang menyebabkan keadaan ini ialah penanganan ikan paska penangkapan yang buruk, yaitu sistem pendinginan konvensional, yang mengakibatkan harga jual ikan di pasar anjlok. Salah satu solusi dari permasalahan ini ialah dengan menggunakan *ice slurry* sebagai sistem pendinginan yang baru.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji sistem refrigerasi dari mesin pembuat *ice slurry* berbahan dasar air laut. Pada penelitian ini akan dicari pada kapasitas bahan dasar berapakah performa *ice slurry generator* berkerja secara optimal. COP, diagram p-h, dan waktu produksi akan menjadi indikator performa sistem refrigerasi. Hasil menunjukkan bahwa *ice slurry generator* berkerja secara optimal dengan jumlah bahan dasar yang digunakan sebanyak 7 liter dengan waktu pengerjaan 76,5 menit dan nilai *coefficient of performance* (COP) rata-rata sebesar 4,35.

Kata Kunci:

Sistem refrigerasi, *ice slurry*, *ice slurry generator*, air laut, performa

ABSTRACT

Name : Arief Setiawan
Study Program : Bachelor of Mechanical Engineering
Title : PERFORMANCE OF REFRIGERATION SYSTEM OF SEA WATER BASED ICE SLURRY GENERATOR

Indonesia is a maritime country that capable to produce an amount of consumption fish in great quantities. This situation is inversely proportional with economy class of fisherman in Indonesia that rated poorly. One of the causal factor of this situation is the treatment after catch of fish that miserably i.e. conventional cooling system, that influence sale price of fish in the market. Ice slurry could be the solution of this problem and replace the conventional cooling system that execrable.

This research slated for examine the refrigeration system of sea water based ice slurry generator. This research will look into obtaining optimal capacity of starting material that wills improve the performance of ice slurry generator. COP, p-h diagram, and production time shall be the indicators of the performance of this refrigeration system. The results indicate that this ice slurry generator did well with starting material at the amount of 7 liters by 76,5 minutes of production times and average coefficient of performance (COP) in number 4,35.

Keywords:

Refrigeration system, ice slurry, ice slurry generator, sea water, performance

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 LATAR BELAKANG	1
I.2 PERUMUSAN MASALAH.....	3
I.3 TUJUAN PENELITIAN.....	4
I.4 PEMBATASAN MASALAH.....	4
I.5 METODOLOGI PENELITIAN	4
I.6 SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
II.1 <i>ICE SLURRY</i>	6
II.1.1 Definisi.....	7
II.1.2 Karakteristik Partikel Es pada <i>Ice Slurry</i>	7
II.1.3 Proses Pembentukan Kristal Es pada <i>Ice Slurry</i>	9
II.1.3.1 <i>Supersaturation</i>	9
II.1.3.2 <i>Nucleation</i>	9
II.1.3.3 Pertumbuhan (<i>Growth</i>)	10
II.1.4 <i>Ice Slurry Generators</i>	10
II.2 SISTEM REFRIGERASI.....	11
II.2.1 Klasifikasi Sistem Refrigerasi.....	12
II.2.2 <i>Refrigerant</i>	14
II.2.3 Siklus Kompresi Uap Satu Tingkat Ideal.....	15
II.2.4 <i>Superheating</i> dan <i>Subcooling</i>	17
II.2.5 Koefisien Kinerja Siklus Refrigerasi (COP).....	19
II.3 KARAKTERISTIK AIR LAUT	19
III.1.1 Salinitas (Kadar Garam) Air laut.....	20
BAB III MODIFIKASI DAN INSTALASI <i>ICE SLURRY GENERATOR</i>.....	22
III.1 STUDI KASUS <i>ICE SLURRY GENERATOR</i> AWAL	23
III.2 MODIFIKASI PADA <i>ICE SLURRY GENERATOR</i> AWAL.....	23
III.3 PERANGKAT <i>ICE SLURRY GENERATOR</i>	27
III.3.1 Kompresor	28
III.3.2 Kondenser.....	29
III.3.3 Alat Ekspansi.....	29
III.3.4 Evaporator	30
III.3.5 Filter Dryer	31
III.3.6 Sistem Pengaman.....	31
III.3.7 Perangkat Mekanik.....	32
III.3.8 Alat Ukur	32

III.3.8.1 Alat Ukur Temperatur	32
III.3.8.2 Alat Ukur Tekanan	34
III.3.8.3 Alat Ukur Kelistrikan	35
III.3.8.4 Alat Ukut Putaran Motor	35
III.3.8.5 Alat Ukur Salinitas Air Laut.....	36
III.4 PROSEDUR PENGAMBILAN DATA.....	37
III.5 VARIASI PENGAMBILAN DATA	38
BAB IV DATA, PENGOLAHAN, DAN ANALISIS	39
IV.1 PENGOLAHAN DATA	39
IV.1.1 Titik Beku Air Laut	39
IV.1.2 Perhitungan COP Sistem Refrigerasi	40
IV.1.3 Pemetaan Siklus pada Diagram P-H	43
IV.2 ANALISIS HASIL PENGOLAHAN DATA	51
IV.2.1 Analisis COP Sistem	51
IV.2.2 Analisis Diagram P-H	53
IV.2.3 Analisis Waktu Produksi	55
IV.2.4 Analisis Perbandingan <i>Ice Slurry Generator</i> Sebelum dan Setelah Modifikasi	57
IV.2.5 Analisis Optimasi Sistem Refrigerasi.....	58
IV.2.6 Analisis Kesalahan	61
BAB V PENUTUP	64
V.1 KESIMPULAN	64
V.2 SARAN	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN A. KODE PROGRAM MATLAB	68
LAMPIRAN B. HASIL Pengerjaan MATLAB.....	71
LAMPIRAN C. GRAFIK KALIBRASI TERMOKOPEL	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Perbandingan ikan tangkapan menggunakan sistem pendinginan media <i>ice slurry</i> dan es balok	2
Gambar 2.1	(a) Tak mampu lolos pada penyaring; <i>ice slurry</i> yang buruk. (b) Mampu lolos pada penyaring; <i>ice slurry</i> yang baik	8
Gambar 2.2	Beberapa jenis dari <i>ice slurry generator</i> . (a) Scraped-surface ice slurry generator. (b) Orbital rod ice slurry generator. (c) Screws ice slurry generator. (d) Ice slurry generator tipe direct contact evaporation. (e) Mekanisme pelepasan partikel es pada sistem fluidized bed generator. (f) Fluidized-bed ice generator	11
Gambar 2.3	Skema aliran peltier dan peltier yang digunakan dalam sistem refrigerasi.....	13
Gambar 2.4	Sebuah <i>thermoacoustic refrigerator</i> dan pengaplikasiannya sebagai sebuah freezer	13
Gambar 2.5	(a) Skema sistem refrigerasi siklus kompresi uap ideal. (b) Diagram p-h. (c) Diagram t-h -nya	15
Gambar 2.6	Unit refrigerasi tipikal yang banyak digunakan untuk keperluan komersial	18
Gambar 2.7	Proses <i>superheating</i> (2 – 2') dan <i>subcooling</i> (4 – 4') pada siklus aktual kompresi uap satu tingkat	18
Gambar 2.8	Persebaran salinitas air laut di seluruh dunia.....	20
Gambar 2.9	Persebaran salinitas air laut untuk kedalaman yang berbeda di seluruh dunia.....	21
Gambar 2.10	Temperatur titik beku air terhadap kadar garam yang terlarut dalam air laut	21
Gambar 3.1	(a) <i>Needle valve</i> . (b) <i>Thermostatic expansion valve</i> (TXV).....	24
Gambar 3.2	Termokopel yang dapat dilepas pasang.....	25
Gambar 3.3	(a) <i>Ice slurry generator</i> sebelum dilakukan modifikasi. (b) <i>ice slurry generator</i> setelah dilakukan modifikasi	26
Gambar 3.4	Skema <i>ice slurry generator</i> baru	27
Gambar 3.5	Kompresor yang digunakan untuk <i>ice slurry generator</i>	29
Gambar 3.6	Fan merk Maspion Elektrik 19 W	29
Gambar 3.7	(a) Evaporator berupa tangki generator. (b) <i>Auger shaft</i> yang dilengkapi dengan <i>scraper</i>	30
Gambar 3.8	<i>Filter dryer</i> yang digunakan pada sistem <i>ice slurry generator</i>	31
Gambar 3.9	<i>Hi-lo pressure control</i> merk Danfoss	31
Gambar 3.10	Motor yang digunakan untuk memutar <i>auger shaft</i>	32
Gambar 3.11	(a) <i>Bare thermocouple</i> . (b) Termokopel yang telah diberi <i>cover</i> berupa pipa kapiler tembaga pada ujung sensornya	33
Gambar 3.12	Data aquisisi yang digunakan, yaitu DAQ produksi <i>National Instrument</i>	33
Gambar 3.13	<i>Interface</i> yang terdapat pada LabView 8.5.....	34
Gambar 3.14	<i>Pressure gauge</i> yang digunakan dalam system.....	35
Gambar 3.15	<i>Clampmeter</i> yang digunakan untuk mengetahui arus kompresor ..	35
Gambar 3.16	<i>Tachometer</i> yang digunakan untuk mengukur putaran motor.....	36

Gambar 3.17	(a) <i>Salinity hydrometer</i> yang digunakan untuk mengetahui nilai salinitas air laut yang digunakan. (b) Jarum indikator menunjukkan salinitas sebesar 33 ppt dengan nilai <i>specific gravity</i> sebesar 1,0245.	36
Gambar 4.1	Hasil pengerjaan MATLAB untuk data jumlah bahan dasar 5 liter siang hari	42
Gambar 4.2	Input data tekanan dan entalpi pada software COOLPACK	44
Gambar 4.3	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 5 liter variasi waktu pengerjaan siang dan malam hari	45
Gambar 4.4	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 7 liter variasi waktu pengerjaan siang dan malam hari	46
Gambar 4.5	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 9 liter variasi waktu pengerjaan siang dan malam hari	47
Gambar 4.6	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 10 liter variasi waktu pengerjaan siang dan malam hari	48
Gambar 4.7	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk pengerjaan siang hari dengan variasi jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 5, 7, 9, dan 10 liter.....	49
Gambar 4.8	Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> untuk pengerjaan malam hari dengan variasi jumlah bahan dasar pembentuk <i>ice slurry</i> sebanyak 5, 7, 9, dan 10 liter ...	50
Gambar 4.9	Perbandingan COP untuk setiap variasi jumlah bahan dasar air laut dan variasi waktu pengerjaan	51
Gambar 4.10	Perbandingan COP untuk variasi waktu pengerjaan	52
Gambar 4.11	<i>Ice slurry</i> yang dihasilkan.....	55
Gambar 4.12	Grafik waktu pembentukan <i>ice slurry</i> untuk jumlah bahan dasar yang berbeda.....	56
Gambar 4.13	Perbandingan nilai COP siste refrigerasi <i>ice slurry generator</i> sebelum dan setelah dimodifikasi.....	57
Gambar 4.14	Sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i> secara sederhana.....	58
Gambar 4.15	Ilustrasi variabel pada sistem refrigerasi <i>ice slurry generator</i>	59
Gambar 4.16	Proses pengolahan dan hasil optimasi menggunakan <i>Optimization Tool</i>	60

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Daya simpan ikan pada berbagai suhu	1
Tabel 2.1	Karakteristik R22.....	14
Tabel 3.1	Perbandingan <i>ice slurry generator</i> awal dan <i>ice slurry generator</i> baru	22
Tabel 4.1	Data tekanan dan temperatur rata-rata untuk setiap variasi jumlah bahan baku pembuat <i>ice slurry</i>	40
Tabel 4.2	Data arus dan tegangan kompresor rata-rata untuk setiap variasi jumlah bahan baku pembuat <i>ice slurry</i>	41
Tabel 4.3	Nilai entalpi di setiap titik untuk variasi jumlah bahan baku <i>ice slurry</i> yang berbeda	42
Tabel 4.4	Hasil pengolahan data menggunakan MATLAB	43
Tabel 4.5	Beberapa variabel yang dicari dengan nilai pembatasnya.....	59
Tabel 4.6	Kode program berupa fungsi objektif dan variabel yang dicari dalam m-file.....	59
Tabel 4.7	Korelasi hasil pengukuran termokopel dan termometer air raksa ..	61
Tabel 4.8	Deskripsi statistik data pengukuran temperatur untuk variasi data 10 liter malam	62

DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL

Simbol	Arti	Satuan
COP	Koefisien kinerja sistem	-
$h_1 \dots h_4$	Entalpi	kJ/kg
I	Arus listrik	A
\dot{m}	Laju aliran masa	kg/s
$P_1 \dots P_4$	Tekanan	kPa
\dot{Q}	Laju perpindahan kalor	Watt
s	Entropi	kJ/K
S	Salinitas	ppt
$T_1 \dots T_5$	Temperatur	Kelvin
V	Tegangan listrik	Volt
\dot{W}	Laju kerja	Watt
Huruf Yunani		
μ	Potensi kimia	J/mol
\emptyset	Sudut fase	$^{\circ}$
Subskrip		
C	Kondensasi	
c	Kompresor	
E	Evaporasi	
S	Solid atau fraksi es	
f	<i>freezing</i>	

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 LATAR BELAKANG

Sebagai negara bahari terbesar di dunia, Indonesia memiliki potensi ekonomi pembangunan kelautan yang sangat besar dan beragam. Salah satu sektor ekonomi kelautan yang dapat dikembangkan guna memajukan dan memakmurkan bangsa Indonesia yaitu kekayaan sumber daya hayati yang dapat diperbaharui (hasil-hasil perikanan). Dengan luas laut Indonesia yang mencapai 5,8 juta km² dan panjang garis pantai 95.181 km, nelayan Indonesia yang berjumlah 2.240.067 orang mampu menyediakan ikan untuk konsumsi pada tahun 2008 pada kisaran angka 6.850.690 ton [1]. Angka ini tergolong besar dan fantastis bila dibandingkan negara penghasil ikan lain.

Kenyataan menunjukkan bahwa meskipun sumber daya alam kelautan Indonesia sangat kaya dan produksi hasil tangkapan nelayan yang sangat besar, namun tidak serta-merta tingkat sosial ekonomi masyarakat nelayan berada di atas garis kemiskinan. Kondisi kehidupan nelayan yang tergolong warga negara berekonomi lemah ini disebabkan oleh banyak faktor, salah satunya ialah sarana pengelolaan dan pengolahan hasil tangkapan yang kurang baik. Proses paska penangkapan ikan hasil tangkapan nelayan yang kurang dikelola dengan baik menyebabkan kualitas tangkapan menurun yang dampaknya berimbas pada nilai jual ikan. Proses paska penangkapan yang sangat vital ialah penanganan kesegaran ikan dan kualitas ikan dengan cara pendinginan dan pembekuan hasil tangkapan.

Tabel 1. 1 Daya simpan ikan pada berbagai suhu.

Ikan yang disimpan pada	Tidak layak dimakan lagi sesudah
16°C	1-2 hari
11°C	3 hari
5°C	5 hari
0°C	14-15 hari

(Sumber: Modul Program Keahlian Budidaya Ikan, Dr. Ir. Masyamsir, M.Eng, 2001)

Proses pendinginan ikan menjadi sangat penting, dengan mendinginkan ikan sampai sekitar suhu 0°C kita dapat memperpanjang masa kesegaran (daya simpan, *shelf-life*) ikan sampai 12-18 hari sejak saat ikan ditangkap dan mati, tergantung pada jenis ikan dan cara penanganan [2]. Pengaruh pendinginan terhadap mutu ikan dapat dilihat pada Tabel 1.1 di atas. Narasumber penulis menjelaskan selama ini menggunakan sistem pengawetan dan pendinginan menggunakan es balok yang ditambah dengan garam untuk menjaga kualitas ikan tangkapan. Dengan harga es balok yang berkisar Rp 18.000/balok dan harga garam Rp 70.000/zak-nya, kenyataan ini tentunya membuat para nelayan menggelontorkan dana tambahan untuk keperluan pendinginan ini. Sistem pendinginan es balok, kurang cocok untuk hasil ikan tangkapan laut karena dapat merusak ikan bahkan setelah ditambah garam pun. Belum lagi banyak ikan yang rusak karena es balok yang bertumbukan langsung dengan tangkapan. Dibutuhkan sistem pendinginan yang lebih modern dengan harga terjangkau dan kualitas ikan tangkapan yang didapatkan lebih baik sehingga nilai jual ikan di TPI (Tempat Pelelangan Ikan) dapat meningkat.



Gambar 1. 1 Perbandingan ikan tangkapan menggunakan sistem pendinginan media *ice slurry* dan es balok.

(Sumber: <http://www.un.org/esa/sustdev/sids>, diakses 19/05/2011)

Salah satu sistem pendinginan yang efektif menggantikan sistem pendinginan konvensional menggunakan es balok ialah sistem pendinginan menggunakan media *ice slurry*. Penggunaan *ice slurry* untuk mendinginkan ikan diharapkan dapat memperpanjang usia kesegaran ikan dikarenakan bersifat lembut

dan luas penampang es yang lebih besar sehingga mengoptimalkan pendinginan dan mempercepat waktu pendinginan (*rapid chilling*) [3]. *Ice slurry* yang berbahan dasar air laut akan semakin baik untuk menjaga kesegaran karena mengandung unsur klorin (Cl) yang dapat membunuh bakteri penyebab pembusukan. Ikan yang didinginkan menggunakan *ice slurry* akan lebih segar dan dapat bertahan lama dibandingkan menggunakan pendinginan tradisional menggunakan es balok seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.

Ice slurry memiliki sifat termodinamika yang sangat baik yaitu kapasitas panas yang besar yang disebabkan pemanfaatan kalor sensibel dan kalor laten sehingga media ini mampu menyerap panas lebih besar untuk massa yang sama dibandingkan larutan brine konvensional [4]. Selain itu meskipun berada pada fase *liquid-ice*, *ice slurry* tetap mampu dialirkan melalui pipa dengan *pressure drop* yang masih terjangkau oleh pompa-pompa pada umumnya.

I.2 PERUMUSAN MASALAH

Keberhasilan pengembangan *ice slurry generator* untuk memenuhi kebutuhan *refrigerant* yang ramah lingkungan dan aplikasi pada dunia medis di Laboratorium Perpindahan Kalor Departemen Teknik Mesin dengan menggunakan bahan baku air murni yang ditambah dengan beberapa bahan aditif seperti *diethylene glycol* merupakan bahan acuan untuk mengembangkan *ice slurry generator* selanjutnya. Penelitian yang dilakukan saat ini adalah pengembangan *ice slurry generator* dengan menggunakan bahan baku air laut di Laboratorium Refrijerasi Departemen Teknik Mesin. Hal ini dimaksudkan guna memenuhi kebutuhan para nelayan di Indonesia untuk sistem pendinginan hasil tangkapan yang lebih baik. Perubahan desain juga telah dilakukan guna mendapatkan dimensi sistem yang lebih optimal, ekonomis, dan akses pengambilan data yang lebih mudah. Penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik dan performa sistem pendinginan serta analisis kualitatif terhadap sistem pendinginan dan *ice slurry* yang dihasilkan dari variasi jumlah bahan baku, sehingga dapat diketahui kapasitas maksimal yang dapat dihasilkan dengan biaya yang seminimal mungkin.

I.3 TUJUAN PENELITIAN

Ada beberapa hal yang ingin dicapai melalui penelitian ini, yaitu:

1. Modifikasi sistem *ice slurry generator* yang telah ada.
2. Menganalisis sistem refrijerasi *ice slurry generator* yang dikhususkan menggunakan bahan baku air laut.
3. Mengetahui performa *ice slurry generator* melalui variasi kapasitas bahan baku dan temperatur lingkungan.

I.4 PEMBATAAN MASALAH

Untuk mencapai tujuan penelitian di atas, skripsi ini dibatasi pembahasannya pada:

1. Satuan yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah dalam standar Satuan Internasional (SI).
2. Sistem pendinginan *ice slurry generator* menggunakan sistem refrijerasi dengan kompresor berkapasitas 1,5 HP merk dagang Tecumseh (Perancis).
3. Tidak dilakukan pembahasan mengenai perhitungan mekanisme *auger shaft*.

I.5 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam melakukan penelitian, digunakan metode-metode yang nantinya akan memudahkan penulis dalam menyusun laporan skripsi, yaitu:

1. Studi literatur
Studi literatur merupakan proses pembelajaran bahan-bahan yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal dan situs-situs internet.
2. Modifikasi *ice slurry generator*
Modifikasi dilakukan dengan pertimbangan seperti optimasi dimensi sistem yang lebih efisien, kemudahan dalam mendapatkan data-data yang diinginkan, peningkatan performa dengan meng-*upgrade* daya kompresor, seta pertimbangan dalam aspek ekonomi.

3. Pengujian *ice slurry generator*

Unjuk kerja alat dilakukan melalui proses kalibrasi termokopel, pengambilan data temperatur dan tekanan pada beberapa titik di sistem *ice slurry generator* dengan beberapa variasi sampel, serta pengolahan data pengujian.

4. Analisis dan kesimpulan hasil pengujian

Setelah data diolah maka dilakukan proses analisis terhadap grafik yang diperoleh. Dari analisis tersebut akan diperoleh kesimpulan terhadap proses pengujian, mengetahui unjuk kerja dari alat *ice slurry generator* dan memberikan saran terhadap pengembangan desain *ice slurry generator* selanjutnya.

I.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan skripsi ini dilakukan menurut urutan bab-bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini seperti sistem refrijerasi, beban pendinginan, *ice slurry* dan perkembangannya, dan sedikit tentang sifat air laut.

BAB III MODIFIKASI DAN INSTALASI ICE SLURRY GENERATOR

Bab ini menguraikan secara lengkap instalasi dari alat uji, mulai dari komponen sistem refrijerasi, instalasi alat ukur dan kalibrasi, modifikasi yang dilakukan, serta prosedur penelitian.

BAB IV DATA, PENGOLAHAN, DAN ANALISIS

Pada bagian ini, data-data hasil pengujian diolah menjadi data berupa grafik dan penjelasan mengenai analisis terhadap kinerja alat.

BAB V PENUTUP

Kesimpulan dan saran dari seluruh penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 ICE SLURRY

Penggunaan es sebagai media yang dapat memperpanjang daya simpan bahan makanan sudah dikenal sejak ribuan tahun yang lalu. Sejak saat itu hingga ratusan tahun belakangan, es yang digunakan sebagai media pendinginan bersumber atau diambil langsung dari alam (es salju atau es yang berasal dari Arctic dan tempat sejenis) [4]. Dengan diperkenalkannya *mechanical cold production technology*, es dapat dibuat dalam berbagai bentuk, seperti blok es, balok, silinder es, atau serpihan es. Beberapa dari bentuk es tersebut membutuhkan beberapa alat manual untuk dapat memindahkannya dari satu tempat ke tempat lainnya, dan kebanyakan memiliki sisi yang tajam yang dapat merusak permukaan produk yang ingin didinginkan jika bersinggungan langsung dengan es. Terlebih lagi, beberapa dari bentuk es ini berbentuk kasar dan juga menunjukkan karakteristik perpindahan panas yang buruk [5].

Karena beberapa kekurangan dari bentuk es yang telah disebutkan di atas, maka beberapa pengguna mulai beralih ke teknologi *ice slurry*. *Ice slurry* pertama kali mulai digunakan oleh bangsa Rusia 80 tahun yang lalu namun perkembangannya dimulai saat beberapa pabrik/perusahaan di Kanada dan Jerman memulai untuk merancang *ice slurry generator* untuk kebutuhan komersial [4]. Karena *ice slurry* bersifat layaknya cairan, maka es dalam bentuk ini dapat dipompa melalui suatu sistem pemipaan atau bahkan disimpan dalam suatu ruang penyimpanan, dimana letak dan bentuk ruang penyimpanan bersifat fleksibel. *Ice slurry* juga berbentuk halus dan dapat memperluas permukaan sentuh sehingga secara langsung akan memperbesar efek perpindahan kalor dan pendinginan yang dihasilkan.

II.1.1 Definisi

Menurut P Egolf dan M Kauffeld, tidaklah mudah untuk memberikan definisi yang pasti mengenai *ice slurry*. Setidaknya ada dua definisi yang dianggap paling mendekati, yaitu [4]:

Definisi 1 : *Ice slurry* terdiri dari sejumlah partikel es yang terdapat/tercampur pada larutan yang mengandung air.

Definisi 2 : *Fine-crystalline ice slurry* adalah *ice slurry* dengan partikel es yang memiliki ukuran diameter rata-rata partikel es sama dengan atau kurang dari 1 mm.

Pada tahap pendefinisian *fine-crystalline ice slurry* ini, kemungkinan ukuran partikel yang merupakan fungsi dari kerapatan masa/densitas diabaikan. Teknologi terkini, yang memproduksi *ice slurry* menggunakan *mechanical scraper-type generators*, mampu menghasilkan *ice slurry* dengan ukuran partikel rata-rata sekitar 200 μm [4]. Secara umum *ice slurry* mempunyai sifat dan karakteristik fisik sebagai berikut [5]:

1. Larutan dan padatan dengan temperatur sampai $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. Dapat dibuat dari larutan *brine* yang dipakai di bawah nilai titik bekunya dengan beban pendinginan pada temperatur antara $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. *Ice slurry* akan menjadi larutan yang mempunyai sifat dan perilaku yang sangat berbeda dengan *brine* yang melarutkannya.
4. Merupakan fluida 2 fasa non-Newtonian pada fraksi es yang tinggi.
5. Memerlukan perhitungan pemipaan, pompa, *heat exchanger*, dan *storage tank* yang berbeda.

II.1.2 Karakteristik Partikel Es pada *Ice Slurry*

Pada umumnya, partikel es yang diproduksi dan tersuspensi dalam larutan yang mengandung air sehingga terbentuk *ice slurry* dengan fluiditas yang buruk dapat dianalogikan dengan seseorang yang ingin menikmati minuman es serbuk yang dihisap melalui sedotan tetapi es tetap berada dalam wadah es. Kasza dan Hiyashi menunjukkan bahwa *ice slurry* harus diproduksi dan direkayasa dalam ukuran skala mikro agar memenuhi kriteria karakteristik partikel es yang baik [6].



Gambar 2. 1 (a) Tak mampu lolos pada penyaring; *ice slurry* yang buruk. (b) Mampu lolos pada penyaring; *ice slurry* yang baik.

(Sumber: Kasza dan Hayashi, *International Journal of Refrigeration* 33, 2010)

Penelitian partikel es pada *ice slurry* telah menggunakan sistem mikroskopik untuk mengetahui bentuk dan kekasaran permukaan untuk penanganan *ice slurry* yang baik dan penanganan *ice slurry* yang buruk. Gambar 2.1 (a) menunjukkan contoh dari *ice slurry* yang buruk yang diproduksi dengan cara mem-*blender* blok es dengan air murni. Seperti yang ditunjukkan pada gambar, ketika *ice slurry* dituangkan ke suatu wadah melalui suatu penyaring dengan ukuran tertentu, maka hanya air yang mampu melalui penyaring sementara partikel es tak mampu melewati penyaring dan menumpuk di sana. Mikroskop yang ditempatkan pada Gambar 2.1 (a) menunjukkan dua tipe partikel es yang membuat *ice slurry* yang buruk, yaitu tipe partikel dendritik dan globular. Bentuk ini memiliki karakteristik sangat kasar, kesat, dan memiliki ukuran partikel es yang cukup besar sehingga partikel es dalam bentuk ini dapat terperjat dalam penyaring. Sementara pada Gambar 2.1 (b), *ice slurry* dibuat dengan cara ditambahkan suatu cairan aditif yang mampu menurunkan titik beku bahan baku *ice slurry*. Hasilnya, *ice slurry* yang diproduksi memiliki fluiditas yang baik sehingga mampu melewati penyaring dengan mulus tanpa menggumpal di penyaring karena memiliki ukuran kristal es yang lebih kecil. Ukuran kristal es ini sangatlah penting, menurut Nandy Putra, sifat-sifat fisik seperti kemampuan mengalir, *heat transfer* dan *heat transfer coefficient* merupakan fungsi dari beberapa parameter dan salah satunya ialah ukuran kristal es [7].

II.1.3 Proses Pembentukan Kristal Es pada *Ice Slurry*

Pembentukan kristal es pada *ice slurry* pada setiap alat *ice slurry generator* selalu melalui tiga tahap dasar, yaitu *supersaturation* dari larutan, *nucleation*, dan perkembangan kristal es (*growth of ice crystals*) [8].

II.1.3.1 *Supersaturation*

Proses kristalisasi hanya dapat muncul jika terdapat daya penggerak (*driving force*) yang memadai, untuk itulah *supersaturation* dari *ice slurry* yang disebabkan oleh larutan sangat dibutuhkan. Pada kondisi ini, larutan berada dalam situasi *non-equilibrium* dan terdapat perbedaan potensi kimia (μ) antara fase larutan dan fase *crystalline solid*-nya:

$$\Delta\mu = \mu_l(T) - \mu_s(T) \quad (2.1)$$

Perbedaan potensi kimia yang terjadi terbentuk akibat adanya *temperature* atau *pressure driving force*. *Supersaturation* dapat terbentuk melalui *supercooling* pada larutan pada temperatur *equilibrium* atau menggeser temperatur *equilibrium* dengan cara mengganti tekanannya.

II.1.3.2 *Nucleation*

Pada larutan *supersaturation*, nukleus awal dapat terbentuk ketika molekul-molekul bersatu dan membentuk kesatuan yang stabil. Keadaan ini dapat muncul baik secara homogen maupun heterogen. Pada nukleasi homogen, fase baru mulai terbentuk dari cairan encer melalui fluktuasi *statistical* dari kesatuan molekul. Pada air, keadaan ini hanya muncul di temperatur yang sangat rendah (umumnya di bawah -40°C). Pada aplikasinya, tipe nukleasi ini jarang terjadi tak seperti nukleasi heterogen yang lebih sering muncul. Sementara tipe nukleasi heterogen, pada permukaan luar molekul terdapat partikel-partikel, kotoran, atau dinding-dinding wadah yang membantu pembentukan nukleus awal. Permukaan dari objek asing ini membantu molekul utama untuk membentuk kisi-kisi kristal. Nukleasi heterogen ini dapat muncul di temperatur yang lebih tinggi dibandingkan nukleasi homogen.

II.1.3.3 Pertumbuhan (*Growth*)

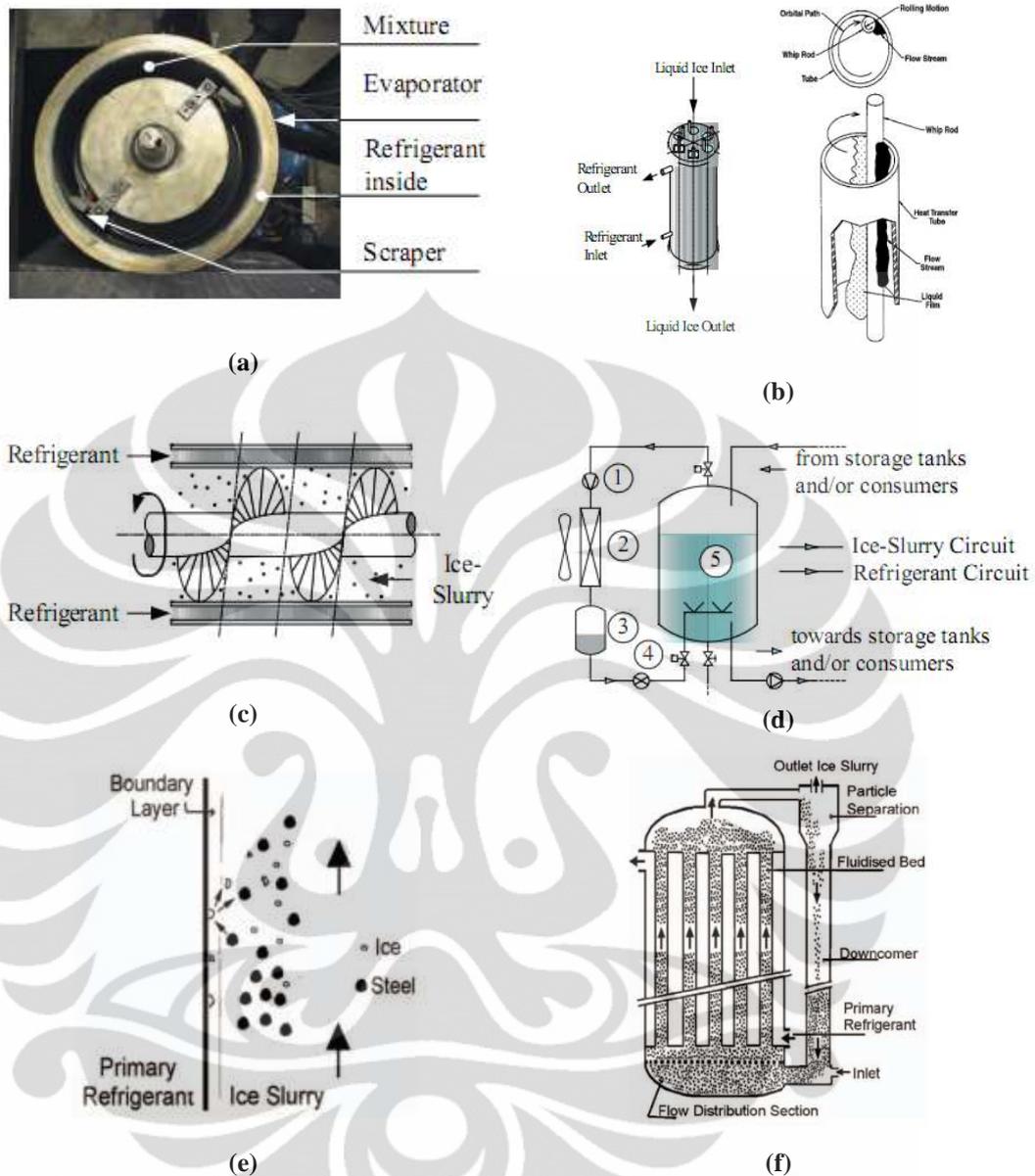
Tahap pertumbuhan nukleus menjadi kristal muncul ketika ada penambahan *solute molecules* dari larutan *supersaturation*. Proses ini umumnya terdiri dari tiga tahap, yaitu transfer masa oleh molekul difusi dari bagian dalam larutan melalui *boundary layer* sekeliling nukleus, pengumpulan molekul ke sekeliling permukaan, dan perpindahan kalor secara simultan dari kristal ke bagian dalam dari larutan.

II.1.4 *Ice Slurry Generators*

Tidak ada tipe *ice slurry generator* yang dapat cocok untuk seluruh situasi. Digunakan *ice slurry generator* yang berbeda untuk aplikasi yang berbeda pula. Secara umum, *ice slurry generator* yang ideal ialah mesin yang mampu memproduksi kristal es dengan ukuran yang sesuai dan diinginkan dengan *rates* perpindahan kalor yang tinggi, tanpa ada penggumpalan pada dinding *heat exchanger*. Berikut merupakan beberapa *ice slurry generator* yang masih banyak digunakan [9]:

1. *Mechanical-scrapers* dengan:
 - *rotating knives* atau *scrape blades* (Gambar 2.2 (a))
 - *rotating cylindrical slabs* (Gambar 2.2 (b))
 - *rotating brushes*
 - *screws* (Gambar 2.2 (c))
2. *Vortex flow type*.
3. *Direct-injection* atau *direct heat exchanger type* (Gambar 2.2 (d)).
4. *Fluidized-bed ice generator* (Gambar 2.2 (e), (f)).

Pada *ice slurry generator* dengan tipe *mechanical scraper*, *refrigerants* melakukan evaporasi pada sebuah tabung yang memiliki dinding ganda, sisi dalam, yang dibatasi dengan silinder bagian dalam, merupakan tempat air atau bahan baku *ice slurry* mengalir. Di bagian ini, kristal es terbentuk pada bagian dinding dalam dan dilepaskan oleh *scraper-scraper* yang berputar. Kristal es ini kemudian terjatuh ke dalam suspensi larutan dan menyatu sehingga fraksi es meningkat. Tipe *ice slurry generator* inilah yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. 2 Beberapa jenis dari *ice slurry generator*. **(a)** Scraped-surface ice slurry generator. **(b)** Orbital rod ice slurry generator. **(c)** Sews ice slurry generator. **(d)** Ice slurry generator tipe direct contact evaporation. **(e)** Mekanisme pelepasan partikel es pada sistem fluidized bed generator. **(f)** Fluidized-bed ice generator.

(Sumber: Kauffeld et al, *Handbook on ice slurries*, 2005)

II.2 SISTEM REFRIGERASI

Proses pendinginan atau refrigerasi pada hakikatnya merupakan proses pemindahan energi panas yang terkandung di dalam suatu zat, baik itu padat, cair, atau gas [10]. Sistem refrigerasi adalah sebuah kombinasi dari komponen-

komponen, peralatan, dan pemipaan yang disambungkan dalam urutan yang berurutan untuk dapat menghasilkan efek refrigerasi.

II.2.1 Klasifikasi Sistem Refrigerasi

Seperti yang diketahui, ada dua metode refrigerasi, yaitu secara natural dan secara mekanik. Metode refrigerasi natural dimulai sejak lama, yaitu menggunakan es sebagai media pendinginan. Sementara pada refrigerasi mekanik, *refrigerants* memainkan peranan penting sebagai substansi yang mampu mentransfer panas, baik itu menyerap panas maupun melepaskan panas dengan baik. Lebih lanjut lagi, Sistem refrigerasi mekanik yang mampu menghasilkan efek refrigerasi dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama berikut [10]:

1. Sistem kompresi uap (*vapor-compression refrigeration systems*)

Dalam sistem ini, kompresor menekan *refrigerant* ke tekanan dan temperatur yang lebih tinggi dari sebuah uap yang terevaporasi pada tekanan dan temperatur yang rendah. *Refrigerant* yang terkompresi dikondensasikan menjadi wujud cair dengan melepaskan kalor laten pengembunan di kondenser. *Refrigerant* cair kemudian dihambat menjadi uap bertekanan dan bertemperatur rendah, yang menghasilkan efek refrigerasi selama proses evaporasi. Sistem ini merupakan sistem yang paling banyak digunakan dan menjadi sistem yang diterapkan pada penelitian ini.

2. Sistem absorpsi (*absorption refrigeration system*)

Dalam sistem ini, efek refrigerasi dihasilkan dengan menggunakan energi termal input. Setelah *refrigerant* cair menghasilkan refrigerasi selama evaporasi pada tekanan yang sangat rendah, uap *refrigerant* diserap oleh sebuah larutan absorbent. Larutan dipanaskan oleh sebuah pembakaran langsung tungku gas atau dengan panas buangan, dan *refrigerant* diuapkan kembali dan kemudian dikondensasi menjadi wujud cair. *Refrigerant* cair dihambat ke tekanan yang sangat rendah dan siap untuk menghasilkan efek refrigerasi lagi.

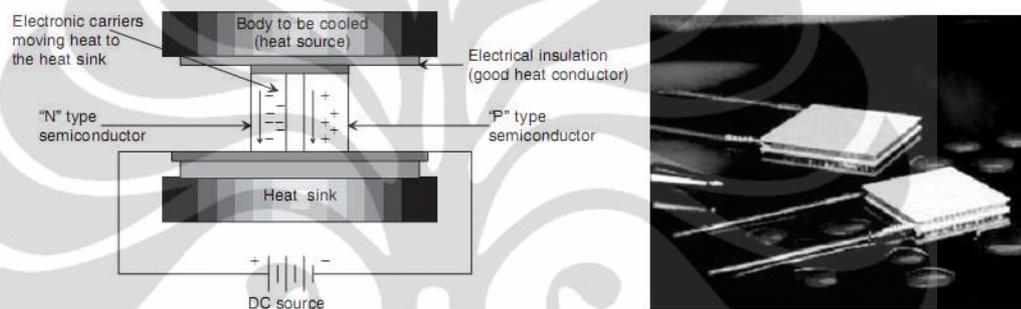
3. Sistem gas ekspansi (*air-standard refrigeration system*)

Dalam sebuah sistem gas ekspansi, gas dikompresi ke tekanan tinggi oleh kompresor. Kemudian didinginkan oleh permukaan air atau udara atmosfer

dan diekspansikan ke tekanan rendah. Karena temperatur gas menurun selama berekspansi, efek refrigerasi dapat dihasilkan.

4. *Jet ejector refrigeration system*
5. *Thermoelectric refrigeration system*

Sistem refrigerasi ini menggunakan elemen peltier dalam sistemnya sebagai pompa kalor. Efek peltier timbul apabila dua buah logam yang berbeda disambungkan dan kedua ujung logam tersebut dijaga pada temperatur yang berbeda, selain itu akan ada fenomena lain yang akan terjadi yaitu fenomena efek joule, efek fourier, efek seebeck, efek peltier dan efek thomson.



Gambar 2. 3 Skema aliran peltier dan peltier yang digunakan dalam sistem refrigerasi.

(Sumber: Ibrahim Dincer et al, *Refrigeration systems and applications*, 2010)



Gambar 2. 4 Sebuah *thermoacoustic refrigerator* dan pengaplikasiannya sebagai sebuah freezer.

(Sumber: Ibrahim Dincer et al, *Refrigeration systems and applications*, 2010)

6. *Thermoacoustic refrigeration system*

Merupakan teknologi baru yang dikembangkan oleh Garret dan Hofler (1992), yang dapat mendinginkan tanpa membutuhkan *refrigerants* sama dengan sistem pendinginan termoelektrik. Mekanisme dasar dari sistem ini sangat simpel dan efisien, suara yang keras dialirkan melalui suatu tabung berongga yang telah diisi oleh beberapa gas tertentu dapat menghasilkan efek refrigerasi. Salah satu aplikasi dari sistem ini digunakan pada sebuah freezer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 di atas.

II.2.2 *Refrigerant*

Menurut Dincer, *Refrigerant* dapat didefinisikan sebagai fluida yang menyerap panas ketika berevaporasi [10]. *Refrigerant* ini akan membantu efek pendinginan ketika berubah fase dari fase liquid ke fase gas, dan umumnya digunakan dalam proses refrigerasi, sistem tata udara, dan sistem *heat pumps*. *Refrigerant* dapat diklasifikasikan menjadi lima kelompok besar, yaitu *halocarbons*, *hydrocarbons*, *inorganic compounds*, *azeotropic mixtures*, dan *nonazeotropic mixtures* [10].

Tabel 2. 1 Karakteristik R22.

Golongan	hydrochlorofouorocarbons (HCFC)
Nama Kimia	Chlorodifluoromethane (CHCF ₂)
Massa Molekul	86,48 gr/mol
Titik didih	-41,5°F/-40,8°C
Operating Pressure	Evaporating pressure at 5°F: 28,3 PSIG Condensing pressure at 86°F: 28,3 PSIG
Liquid Volume	at 5°C: 0,012 ft ² /lb
Vapor Volume	at 5°C: 1,25 ft ² /lb
Liquid Density	at 86°C: 73,4 lb/ft ³
ODP	0,05 (R-11 = 1)
GWp	0,4 (R-11 = 1)

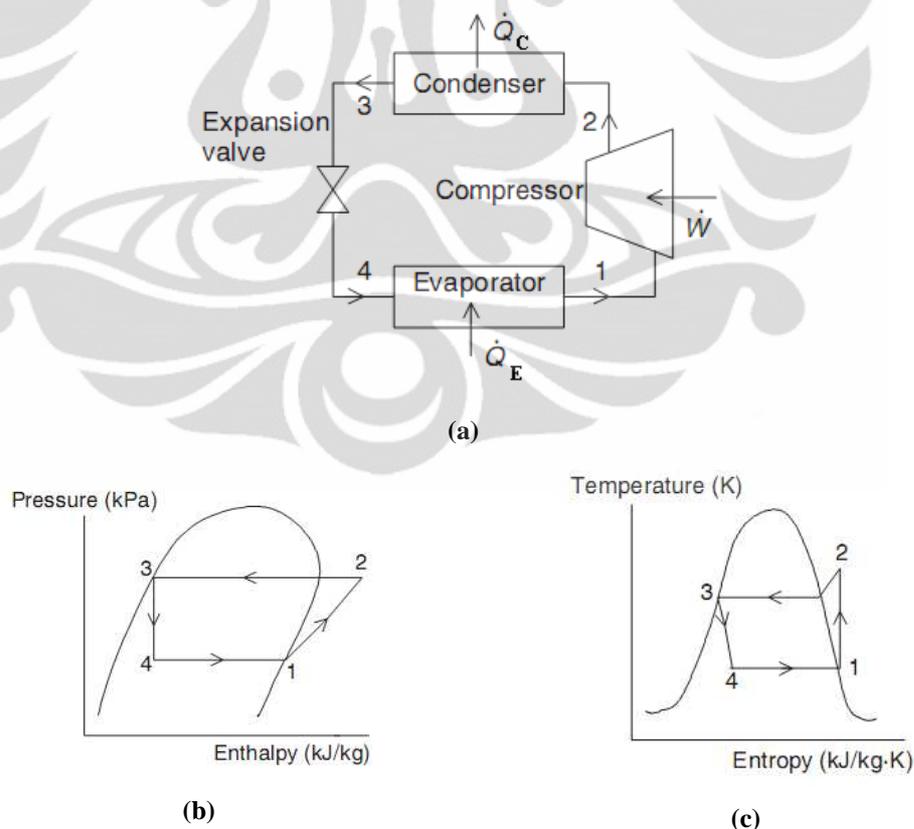
(Sumber: Rex Miller et al, *Air Conditioning and Refrigeration*, 2006)

Kelompok *refrigerant halocarbon* merupakan kelompok yang paling banyak digunakan untuk sistem refrigerasi dan tata udara secara luas sebagai *refrigerants*. *Halocarbons* terdiri dari satu atau lebih dari tiga gas halogen berikut, yaitu *chlorine*, *flourine*, atau *bromine*. Dalam penelitian kali ini, digunakan

refrigerant jenis halocarbons, yaitu R22. Karakteristik *refrigerant* R22 terlihat pada Tabel 2.1 di atas.

II.2.3 Siklus Kompresi Uap Satu Tingkat Ideal

Dalam aplikasi praktis, siklus kompresi uap satu tingkat merupakan sistem refrigerasi yang paling banyak digunakan, dan setiap sistem ini memerlukan kompresor sebagai komponen utamanya. Ketika sebuah *refrigerant* mengalami sederetan proses seperti evaporasi, kompresi, kondensasi, dan ekspansi, yang menyerap kalor dari sumber yang didinginkan dan membuang kalor tersebut ke lingkungan, maka *refrigerant* tersebut telah menjalani sebuah siklus refrigerasi. Jika kondisi akhir sama dengan kondisi awal, disebut siklus tertutup. Sistem refrigerasi kompresi uap bisa dikelompokkan sebagai siklus satu tingkat, siklus banyak tingkat, siklus campuran, dan siklus tuang (*cascade*). Dalam penelitian ini, siklus yang digunakan ialah siklus kompresi uap satu tingkat.



Gambar 2. 5 (a) Skema sistem refrigerasi siklus kompresi uap ideal. (b) Diagram p-h. (c) Diagram t-h -nya.

(Sumber: Ibrahim Dincer et al, *Refrigeration systems and applications*, 2010)

Diagram tekanan-entalpi (*pressure-enthalpy diagram*) atau diagram p-h dan diagram temperatur-entalpi (*temperature-enthalpy diagram*) atau diagram t-h sering digunakan untuk menghitung transfer energi dan untuk menganalisa kinerja dari sebuah siklus refrigerasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (b) dan Gambar 2.5 (c) di atas. Dalam diagram p-h, Garis cairan jenuh dan uap jenuh melingkupi daerah dua fase dimana uap dan cair berdampingan. Daerah dua fase memisahkan daerah cairan bawah dingin (*subcooling*) dan daerah uap panas lanjut (*superheated*). Setiap jenis *refrigerant* mempunyai diagram p-h dan t-h yang berbeda tergantung pada sistem refrigerasi dan jenis *refrigerant*-nya.

Sebuah siklus ideal mempunyai proses kompresi isentropis, dan rugi-rugi tekanan dalam saluran pipa, katup, dan komponen lainnya yang diabaikan. Satu tingkat berarti hanya ada satu tingkat kompresi. Ada empat proses refrigerasi dalam siklus kompresi uap satu tingkat ideal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, yaitu evaporasi, kompresi, kondensasi, dan ekspansi.

1. Proses evaporasi isothermal (4 - 1)

Refrigerant berevaporasi secara penuh dalam evaporator dan menghasilkan efek refrigerasi. Proses ini terjadi karena temperatur dari *refrigerant* lebih rendah dari temperatur lingkungan sehingga kalor dari lingkungan dapat diserap oleh *refrigerant* dan dipakai oleh *refrigerant* untuk merubah fasenya menjadi uap jenuh. Besarnya efek refrigerasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\dot{Q}_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.2)$$

2. Proses kompresi isentropis (1 - 2)

Refrigerant memasuki kompresor pada keadaan uap jenuh dan kemudian dimampatkan sampai pada tekanan kondensasi. Pada saat pemampatan ini, temperatur *refrigerant* sendiri akan naik dan melebihi temperatur lingkungan. Idealnya, proses kompresi ini terjadi isentropis yaitu tidak terjadi perubahan entropi selama proses. Kerja kompresor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

3. Proses kondensasi isothermal (2 - 3)

Setelah dimampatkan, *refrigerant* akan melalui kondenser. Pada kondenser terjadi pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan. Proses pendinginan ini akan menyebabkan perubahan fasa *refrigerant* dari uap menjadi cairan. Proses berlangsung pada tekanan konstan sampai mencapai cair jenuh. Besarnya kalor yang dibuang ke lingkungan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2.4)$$

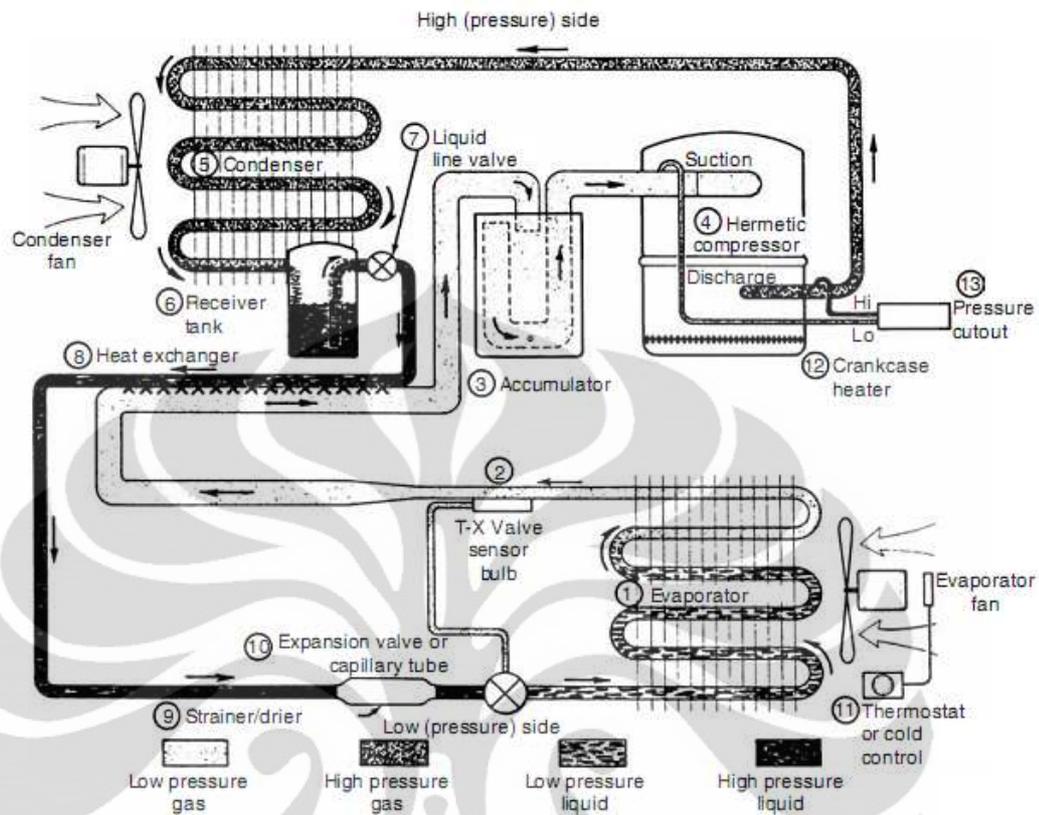
4. Proses ekspansi (3 - 4)

Refrigerant cair akan melalui suatu alat ekspansi (*TXV, needle valve, pipa kapiler*) yang bertujuan untuk menurunkan tekanan *refrigerant* secara drastis hingga tekanan evaporasinya. Sebagian cairan berubah menjadi uap dan memasuki evaporator untuk melakukan efek refrigerasi karena temperaturnya sekarang menjadi sangat rendah untuk dapat menyerap kalor.

II.2.4 Superheating dan Subcooling

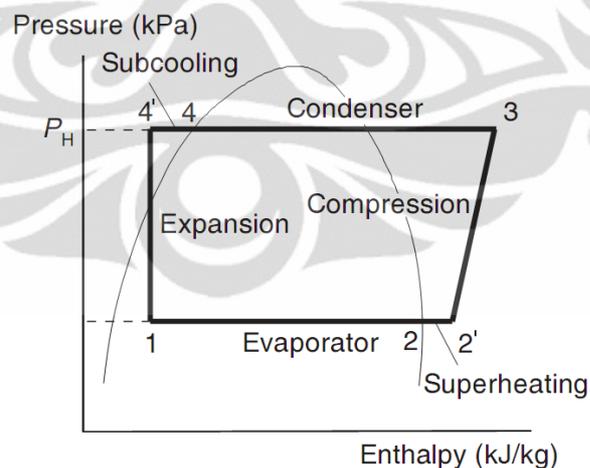
Ada beberapa perbedaan yang membedakan antara siklus aktual refrigerasi kompresi satu uap dengan idealnya, yaitu *pressure drop, temperature drop*, perpindahan kalor dari atau ke lingkungan, serta yang paling utama adalah proses *superheating* dan *subcooling*. Skema refrigerasi kompresi uap aktual yang banyak dijumpai digunakan secara komersial terdapat pada Gambar 2.6.

Superheating adalah proses penambahan kalor sensibel pada uap *refrigerant* sebelum masuk kompresor setelah mengalami perubahan fase di evaporator [10]. Apabila proses *superheating* ini terjadi pada evaporator, maka entalpi dari *refrigerant* akan meningkat sehingga menambahkan sejumlah panas dan meningkatkan efek refrigerasi pada evaporator. Besarnya derajat *superheat* pada evaporator dapat diketahui dari perbedaan temperatur *refrigerant* antar temperatur didih dengan temperatur keluar evaporator. Pada diagram p-h proses *superheating* dan *subcooling* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 6 Unit refrigerasi tipikal yang banyak digunakan untuk keperluan komersial.

(Sumber: Ibrahim Dincer et al, *Refrigeration systems and applications*, 2010)



Gambar 2. 7. Proses *superheating* (2 – 2') dan *subcooling* (4 – 4') pada siklus aktual kompresi uap satu tingkat.

(Sumber: Ibrahim Dincer et al, *Refrigeration systems and applications*, 2010)

Subcooling adalah proses penurunan temperatur *refrigerant* melewati garis saturasinya pada tekanan tetap [10]. Proses yang terjadi pada kondenser bertujuan untuk meningkatkan efek refrigerasi. *Subcooling* terjadi karena pendinginan pada

kondenser seperti air atau udara dapat mempercepat laju penurunan temperatur *refrigerant* dalam kondenser. Besarnya derajat *subcooled* ini tergantung pada temperatur media pendingin kondenser (udara/air) selama proses kondensasi, serta konstruksi dan kapasitas kondenser.

II.2.5 Koefisien Kinerja Siklus Refrigerasi (COP)

Coeffisient of Performance (COP) adalah bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan kinerja dari sebuah siklus termodinamik atau sistem termal. Besarnya COP dapat dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$COP = \frac{\text{efek pendinginan yang diperoleh}}{\text{energi input dari luar}} \quad (2.5)$$

Untuk sistem refrigerasi kompresi uap mekanis, persamaan di atas dapat menjadi.

$$COP = \frac{Q_E}{W_c} \quad (2.6)$$

Untuk mendapatkan nilai kerja kompresor (W_c) dapat dihitung dari arus rata-rata yang mengalir pada kompresor yang diukur saat pengambilan data, dikalikan dengan tegangan listrik dari sumber PLN (220 V) dan nilai $\cos \emptyset$ (Nilai $\cos \emptyset$ di Lab Refrigerasi FTUI ialah sebesar 0.98), sehingga didapat persamaan berikut.

$$W_c = V \times I \times \cos \emptyset \quad (2.7)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.7) ke persamaan (2.3) maka diperoleh besar laju aliran *refrigerant* dalam sistem, yaitu.

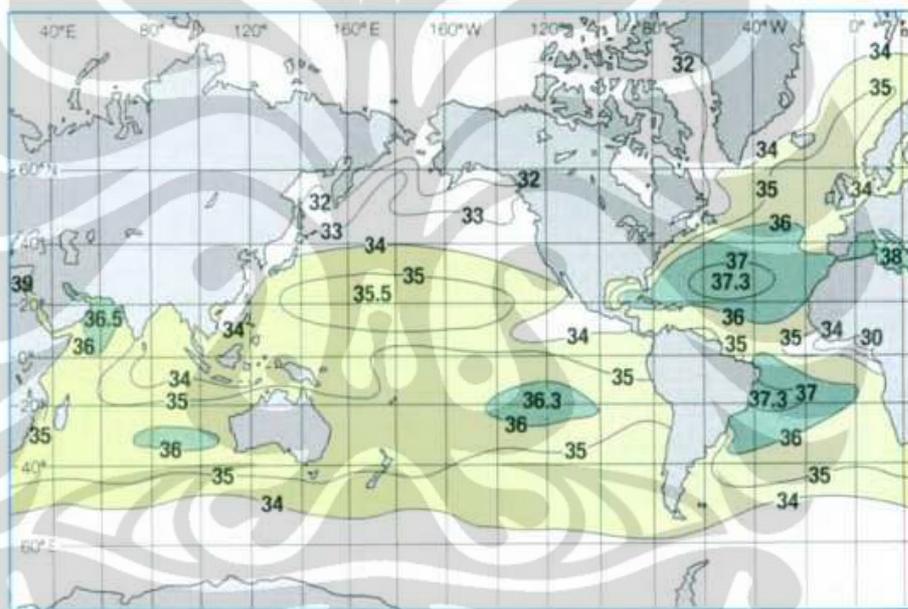
$$\dot{m} = \frac{V \times I \times \cos \emptyset}{(h_2 - h_1)} \quad (2.8)$$

II.3 KARAKTERISTIK AIR LAUT

Lautan mengandung kurang lebih 97% air yang terus menerus bersirkulasi melalui siklus hidrologi [12]. Air yang berada di lautan yang mengandung berbagai macam komposisi seperti garam-garaman, gas-gas terlarut, bahan-bahan organik, dan partikel-partikel tak larut dapat didefinisikan sebagai air laut. Salah satu sifat air laut yang sangat mempengaruhi karakteristik air laut ialah salinitas.

II.3.1 Salinitas (Kadar Garam) Air laut

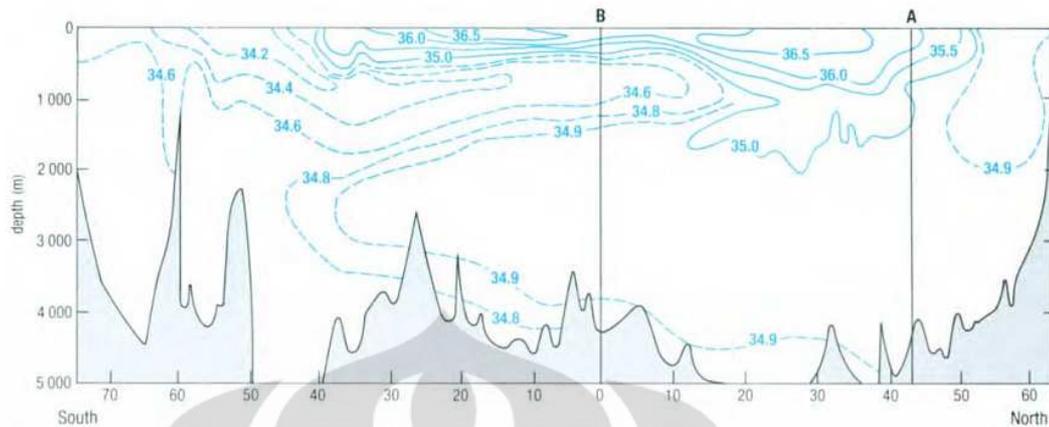
Di lautan, rata-rata konsentrasi kandungan garam terlarut (salinitas) ialah sebesar 3,5% dari beratnya [12]. Satuan salinitas adalah *part per thousand* (ppt) atau per part per mil (ppm) sehingga rata-rata kandungan garam di laut ialah 35 ppt. Kadar salinitas menentukan jenis perairan di suatu lokasi, perairan dengan kadar salinitas < 5 ppt tergolong ke dalam kelompok air tawar, kadar salinitas 5 – 30 ppt masuk ke dalam golongan air payau, salinitas 30 -35 ppt masuk ke golongan air *saline* dan jika kadar garamnya diatas 50 maka sudah termasuk ke dalam golongan air *brine*.



Gambar 2. 8 Persebaran salinitas air laut di seluruh dunia.

(Sumber: Evelyn Brown et al, *Seawater:Its Composition, Properties and Behaviour*, 2004)

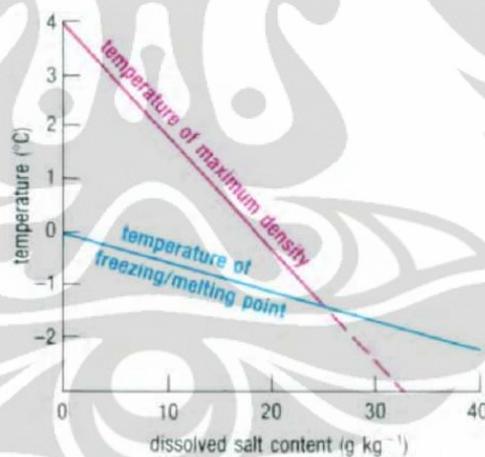
Salinitas di setiap lokasi di perairan dunia memiliki tingkat yang berbeda-beda. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu insolasi, presipitasi dan evaporasi [12]. Insolasi adalah energi matahari yang berbentuk cahaya dan panas yang mempengaruhi temperatur air laut. Presipitasi adalah kondensasi uap air di udara yang bercampur di laut, sedangkan evaporasi adalah penguapan air laut ke udara. Persebaran salinitas air laut di seluruh dunia dapat dilihat pada Gambar 2.8 di atas. Kedalam air laut juga mempengaruhi salinitas dari air laut, Gambar 2.9 menunjukkan persebaran salinitas air laut untuk kedalaman yang berbeda.



Gambar 2. 9 Persebaran salinitas air laut untuk kedalaman yang berbeda di seluruh dunia.

(Sumber: Evelyn Brown et al, *Seawater: Its Composition, Properties and Behaviour*, 2004)

Kadar garam yang terlarut pada air laut memberikan pengaruh pada temperatur titik beku (*freezing point*) air laut. Titik beku air laut menjadi hal yang penting karena dari sinilah parameter penelitian dapat dinilai. Gambar 2.10 menunjukkan pengaruh kadar garam pada air laut terhadap titik bekunya.



Gambar 2. 10 Temperatur titik beku air terhadap kadar garam yang terlarut dalam air laut.

(Sumber: Evelyn Brown et al, *Seawater: Its Composition, Properties and Behaviour*, 2004)

Nilai titik beku air laut (dalam °C) juga merupakan fungsi dari salinitas dan tekanan sehingga membentuk persamaan sebagai berikut [13]:

$$T_f(S, P) = -0.0575 S + 1.710523 \times 10^{-3} S^{3/2} - 2.154996 \times 10^{-4} S^2 - 7.53 \times 10^{-3} P \quad (2.9)$$

BAB III

MODIFIKASI DAN INSTALASI *ICE SLURRY GENERATOR*

III.1 STUDI KASUS *ICE SLURRY GENERATOR* AWAL

Penelitian ini dilakukan menggunakan *ice slurry generator* yang sudah ada dan merupakan suatu proses berkelanjutan dari penelitian sebelumnya. Studi kasus ini dilakukan untuk mempelajari dan menganalisis permasalahan yang dihadapi menyangkut pemahaman objek berupa *ice slurry generetor* awal, sehingga akan memperjelas masalah atau tugas yang akan diproses selanjutnya. Penelitian sebelumnya telah menghasilkan sebuah sistem pendinginan lengkap dengan seluruh komponennya sehingga dapat menghasilkan *ice slurry*. Sistem sebelumnya memiliki dimensi yang besar dan cukup kompleks. Selain itu tidak disertakan temperatur dalam evaporator yang menunjukkan temperatur si fluida yang didinginkan. Nilai ini sangatlah penting untuk menunjukkan apakah tujuan sistem refrigerasi telah tercapai atau tidak.

Tabel 3. 1 Perbandingan *ice slurry generator* awal dan *ice slurry generator* baru.

No	Tuntutan	Analisa Ice Slurry Generator Awal	
		Ice Slurry Generator awal	Ice Slurry Generator baru
1	Fungsi	Menghasilkan ice slurry dengan bahan baku berupa air tawar murni yang ditambah dengan bahan aditif	Menghasilkan ice slurry dengan bahan baku berupa air laut murni
2	Kapasitas	± 10 liter	± 10 liter
3	Pencapaian suhu Refrigerant	-25°C	Lebih rendah, diharapkan -30°C
4	Konstruksi	Besar dan terlalu memakan banyak tempat	Dimensi diharapkan lebih kecil dan sederhana agar dapat mudah ditempatkan di atas kapal
5	Portabilitas	Mudah dipindahkan tetapi agak berat	Mudah dipindahkan dengan tenaga yang sedikit
6	Kemudahan Akses Data	Sistem pengambilan data fix dan agak rumit	Sistem pengambilan data fleksibel dan mudah diakses
7	Lama Pendinginan	Sangat lama lebih dari 6 jam	Lebih cepat diharapkan kurang dari 6 jam

Lanjutan Tabel 3.1

8	Penggunaan	Mudah digunakan	Mudah digunakan oleh orang awam sekalipun
9	Berat	Sangat berat, dibutuhkan tenaga 2 orang untuk memindahkannya	diharapkan seringan mungkin, maksimum sama
10	Harga investasi dan produksi	Mahal, banyak komponen dengan material yang mahal dan sistem terlalu kompleks, selain itu biaya yang dibutuhkan untuk menjalankan sistem sangat besar	Diharapkan biaya investasi lebih rendah dan biaya untuk menjalankan sistem lebih murah

Pada rancang bangun kali ini, pengembangan yang dilakukan meliputi berbagai aspek. Tabel 3.1 menunjukkan beberapa daftar tuntutan yang memperjelas batasan-batasan masalah pembuatan konsep rancangan dan persyaratan apa saja yang harus dipenuhi oleh *ice slurry generator* baru dibandingkan dengan *ice slurry generator* yang telah ada. Berdasarkan daftar tuntutan tersebut dilakukanlah beberapa modifikasi pada *ice slurry generator* lama agar tuntutan-tuntutan tersebut terpenuhi.

III.2 MODIFIKASI PADA ICE SLURRY GENERATOR AWAL

Setelah melakukan penilaian terhadap daftar tuntutan dan studi kasus *ice slurry generator* yang telah ada sebelumnya, maka hasil penilaian yang didapatkan menentukan konsep modifikasi yang cocok sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini. Modifikasi yang dilakukan meliputi beberapa aspek, yaitu:

1. Upgrade Kompresor

Hal ini dimaksudkan agar tuntutan nomor 1, 3, dan 7 terpenuhi. Kompresor lama dengan daya sebesar 1 HP digantikan dengan kompresor baru berdaya 1,5 HP dengan merk yang sama. Walaupun harga investasi dan operasional menjadi lebih mahal, namun efek yang dirasakan dari penggantian ini cukup seimbang.

2. Penggantian Alat Ekspansi

Alat ekspansi yang sebelumnya, yaitu *thermostatic expansion valve* (TXV) digantikan fungsinya dengan *needle valve*. Hal ini dimaksudkan agar derajat

bukaan (*throttling*) dan derajat *superheat*-nya dapat lebih mudah diatur sehingga dapat menghasilkan suhu *refrigerant* yang diinginkan, yaitu lebih rendah dari sistem sebelumnya yang telah ada. Dengan demikian, maka tuntutan nomor 3 dapat terpenuhi.



Gambar 3. 1 (a) *Needle valve*. (b) *Thermostatic expansion valve (TXV)*.

3. Penghilangan Komponen Tangki Kolektor

Tangki kolektor membuat sistem yang telah ada sebelumnya memiliki dimensi yang cukup besar. Fungsinya yang hanya sebagai penampung *ice slurry* yang telah ada juga menjadikan komponen ini tidaklah terlalu penting. Oleh karena itu, guna memenuhi tuntutan nomor 4, 5, 9, dan 10, maka komponen ini dihilangkan pada sistem yang baru. Dengan dihilangkannya komponen ini, maka *ice slurry* yang telah diproduksi pada tangki generator langsung dialirkan ke luar oleh selang agar langsung digunakan.

4. Penghilangan Komponen *Water Circulation Circuit*

Komponen ini merupakan sistem pendukung pada tabung kolektor yang berfungsi untuk mengalirkan *ice slurry* yang telah cair di tabung kolektor ke tabung reservoir untuk kembali didinginkan. Karena Komponen tabung

kolektor dihilangkan, maka sistem *water circulation circuit* juga dapat dihilangkan.

5. Penggantian Sistem Pengambilan Data

Pada sistem *ice slurry generator* sebelumnya, terdapat empat termokopel yang dipasang pada sebelum dan setelah kompresor juga sebelum dan setelah TXV. Termokopel yang digunakan merupakan termokopel tipe K yang ditempel *fix* pada titik tersebut sehingga tak dapat dilepas kembali apabila dibutuhkan. Perubahan yang dilakukan ialah dengan mengganti metode penempelan termokopel yang dapat dilepas pasang (*inserted termocouple*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Ujung sensor pada termokopel ini diberi *cover* berupa pipa kapiler tembaga yang ujungnya di las. Selain itu, terdapat satu penambahan termokopel yang ditempatkan di dalam tabung generator yang berfungsi untuk mengetahui temperatur benda uji. Data akuisisi yang digunakan pada penelitian ini juga berbeda, yaitu menggunakan data akuisisi National Instruments.



Gambar 3. 2 Termokopel yang dapat dilepas pasang.

Perbandingan antara sistem *ice slurry generator* awal dengan sistem *ice slurry generator* baru dapat dilihat pada Gambar 3.3 (a) dan Gambar 3.3 (b) di bawah.



(a)

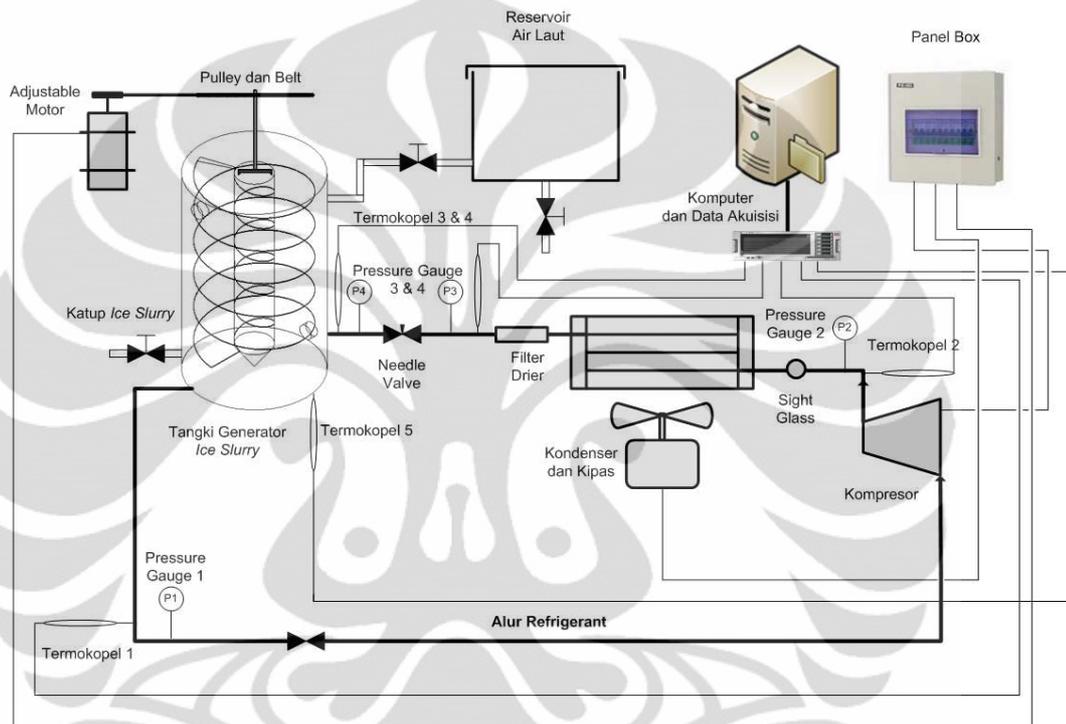


(b)

Gambar 3.3 (a) *Ice slurry generator* sebelum dilakukan modifikasi. (b) *ice slurry generator* setelah dilakukan modifikasi.

III.3 PERANGKAT INSTALASI *ICE SLURRY GENERATOR*

Sistem *ice slurry generator* terdiri dari beberapa subsistem, yaitu sistem refrigerasi, sistem mekanik pemecah es, dan sistem pengambilan data yang setiap subsistemnya terdiri dari beberapa komponen. Gambar 3.4 menunjukkan skema dari sistem *ice slurry generator* yang dapat menghasilkan *ice slurry* berbahan dasar air laut.



Gambar 3.4 Skema *ice slurry generator* baru.

Pada sistem ini, *refrigerant*, yaitu R22 akan dinaikkan tekanannya pada kompresor yang kemudian melewati *sight glass* yang berfungsi sebagai indikator cukup tidaknya jumlah *refrigerant*. Kemudian *refrigerant* berfasa uap ini akan melalui kondenser untuk dilepas panasnya ke lingkungan dan berubah fasa menjadi cair. *Refrigerant* ini kemudian akan melalui *filter dryer* untuk dibersihkan kotorannya dan dipisahkan dari asam. *Refrigerant* kemudian akan melalui alat ekspansi berupa *needle valve* yang berfungsi untuk menurunkan tekanan. Setelah melalui *needle valve*, *refrigerant* akan mengalami penurunan tekanan secara drastis dan temperatur akan anjlok mencapai suhu minus. *Refrigerant* bersuhu rendah inilah yang dimanfaatkan untuk mendinginkan air laut agar dirubah menjadi *ice slurry* di evaporator. Pada evaporator yang berupa tangki generator

ini, *refrigerant* akan menyerap panas air laut dan merubahnya menjadi padatan es. Dalam tangki generator ini terdapat sistem mekanik pemecah es menjadi *ice slurry* yang disebut *auger shaft* yang diputar dengan mekanisme motor dan transmisi *pulley* dan *belt*. Dengan kecepatan yang dapat diatur, motor ini selain berfungsi untuk menggerus es yang dihasilkan juga berfungsi untuk mencegah pengendapan pada tangki generator dan menyeragamkan proses pendinginan. *Ice slurry* yang telah diproduksi dapat dikeluarkan dari tangki generator lewat saluran yang terdapat di bawah tangki generator yang dikontrol dengan *gate valve*. Dari sini *refrigerant* akan kembali ke kompresor dan mengalami siklus tertutup. Air laut sebagai bahan baku dapat dimasukkan ke dalam sistem melalui tangki reservoir yang terhubung dengan tangki generator lewat pipa nylon yang dikontrol dengan *gate valve*.

Dalam instalasi sistem ini dipasang lima termokopel dan empat *pressure gauge* yang digunakan untuk mengetahui parameter fisik dari sistem refrigerasi di dalam siste *ice slurry generator*. Setiap termokopel dan *pressure gauge* diletakan sepasang pada sebelum dan setelah kompresor dan sebelum dan setelah alat ekspansi. Sementara termokopel satu lagi dipasang di dalam tangki generator untuk mengetahui suhu dari air laut yang didinginkan. Selain itu digunakan *clampmeter* untuk mengetahui arus yang digunakan oleh kompresor dan *tachometer* untuk mengetahui putaran motor.

Setiap komponen pada *ice slurry generator* mempunyai fungsi yang spesifik, berikut ini akan dijelaskan spesifikasi dan fungsi dari masing-masing bagian yang ada pada *ice slurry generator*.

III.3.1 Kompresor

Komponen ini merupakan komponen terpenting dalam suatu siklus refrigerasi. Kompresor yang digunakan merupakan kompresor *hermetic* bermerk Tecumseh dengan daya 1,5 HP. Kompresor ini berkerja pada tegangan 220-240 V/50 Hz dan memiliki dimensi 29 x 12 x 20 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Diharapkan dengan penggunaan kompresor ini, maka proses pembekuan menjadi lebih cepat.



Gambar 3. 5 Kompresor yang digunakan untuk *ice slurry generator*.

III.3.2 Kondenser

Kondenser yang digunakan masih sama dengan *ice slurry generator* sebelumnya, yaitu kondenser unit *AC window* dengan 19 belokan yang masing-masing memiliki panjang 42 cm dan diameter 3/8 inch. *Fan* yang digunakan ialah Maspion Elektrik 19 W seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Fan merk Maspion Elektrik 19 W.

III.3.3 Alat Ekspansi

Alat ekspansi yang digunakan ialah berupa *needle valve* merk Hylok tipe GB2SW bermaterial *stainless steel* yang tahan hingga tekanan 6000 psi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 (a). *Valve* ini dapat digunakan untuk *throttling* dengan sangat akurat dan juga dapat digunakan pada tekanan dan/atau temperatur tinggi. Kelemahan dari penggunaan alat ekspansi ini ialah pengaturannya yang harus secara manual dan tidak responsive terhadap perubahan beban pendinginan yang diterima oleh evaporator.

III.3.4 Evaporator

Evaporator pada *ice slurry generator* merupakan tangki generator, yaitu sebuah tabung dengan material dinding dalam berupa *stainless steel* berdiameter 260 mm dengan tebal dinding dalam 1 mm. Tangki ini dililit dengan pipa tembaga menyerupai evaporator tipe tabung dan koil. Pada bagian tengah tangki ini dilapisi dengan *expanded polyurethane* 60 mm dan kemudian pada dinding bagian paling luar dilapisi plat aluminium. Desain seperti ini dirancang agar memaksimalkan proses perpindahan kaor dari evaporator ke beban pendinginan [14]. Secara keseluruhan tangki generator ini memiliki volume sebesar 0.016 m^3 . Pada bagian bawah tangki generator ini terdapat saluran keluar *ice slurry* yang telah jadi berupa selang yang menjulur ke bawah yang dikontrol dengan *gate valve*. Tangki generator ini juga dilengkapi dengan *auger shaft* sebagai pengaduk dan pemecah es sehingga padatan yang terbentuk akan hancur dan menjadi serbuk. *Auger shaft* pada tangki generator ini juga dilengkapi dengan tiga buah *scraper* bermaterial *high density polyurethane*. Material ini dipilih karena bersifat tahan karat, memiliki perbandingan densitas dan *strength* yang cukup kuat, lebih lembut dari logam *stainless steel*, dan memiliki ketahanan terhadap *wear* yang baik [15]. yang berfungsi untuk meningkatkan perpindahan kalor dengan cara menyapu atau menghancurkan lapisan *mushy* yang terbentuk pada dinding dalam tangki generator.



(a)



(b)

Gambar 3. 7 (a) Evaporator berupa tangki generator. (b) *Auger shaft* yang dilengkapi dengan *scraper*.

III.3.5 Filter Dryer

Filter dryer yang digunakan masih sama seperti *filter dryer ice slurry generator* sebelumnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. *Filter dryer* yang digunakan ialah merk Emerson/EK 163 dengan kemampuan *refrigerant* CFC, HCFC, dan HFC. Alat ini berfungsi untuk menyingkirkan partikel-partikel yang berpotensi merusak sistem ketika beroperasi, seperti logam, debu, kotoran, hingga partikel yang dapat larut yang mungkin masuk ke dalam sistem ketika proses instalasi alat berlangsung.



Gambar 3. 8 *Filter dryer* yang digunakan pada sistem *ice slurry generator*.

III.3.6 Sistem Pengamanan

Sistem pengaman yang digunakan pada perangkat *ice slurry generator* ini ialah berupa *hi-lo pressure control* merk Danfoss. Alat ini berkerja dengan cara memutuskan rangkaian listrik sehingga kompresor berhenti. Kompresor akan berhenti berkerja jika tekanan berada diluar batas tekanan yang diijinkan. Pada perangkat kali ini nilai batas bawah yang diijinkan ialah (*cut in*) sebesar 0 bar dan nilai batas atas (*cut out*) sebesar 24 bar. Perangkat sistem pengamanan ini dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 *Hi-lo pressure control* merk Danfoss.

III.3.7 Perangkat Mekanik

Perangkat mekanik ini merupakan mekanisme yang digunakan untuk memutar *auger shaft* sehingga dapat menghasilkan *ice slurry*. Perangkat ini berupa motor listrik yang putarannya ditransmisikan dengan menggunakan *flat belt* yang menghubungkan *pulley* pada poros motor dan *pulley* pada *auger shaft*. Motor ini merupakan motor merk New Power berdaya 1 HP dengan tegangan 180V/5,1A yang dapat diatur kecepatannya hingga mencapai 3000 rpm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Motor yang digunakan untuk memutar *auger shaft*.

III.3.8 Alat Ukur

Pada penelitian kali ini, ada beberapa parameter fisik yang ingin diketahui, yaitu temperatur, tekanan, arus kompresor, tegangan kompresor, putaran motor, dan salinitas air laut. Parameter fisik ini nantinya akan diolah untuk dianalisis lanjut sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai oleh penelitian.

III.3.8.1 Alat Ukur Temperatur.

Pada penelitian kali ini, ada lima titik pada sistem refrigerasi yang ingin diukur nilai temperaturnya mempergunakan termokopel tipe-K dengan material pembentuknya adalah Kromel (Nikel-Kromium) dan Alumel (Nikel-Alumunium), termokopel menggunakan prinsip efek Seebeck dalam pengukuran temperatur, dengan pembangkit tegangan sebagai fungsi dari gradien temperatur. Nilai dan fungsi dari gradien temperatur tersebut bergantung pada jenis komposisi material termokopel yang digunakan. Ujung termokopel yang berupa sensor kemudian dibuat sedemikian rupa hingga bersifat fleksibel dan dapat dibongkar pasang

(*inserted thermocouple*) pada sistem menggunakan *cover* berupa pipa kapiler tembaga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11 (b). Dikarenakan termokopel mengalami perlakuan panas, maka termokopel harus dikalibrasi terlebih dahulu.



Gambar 3.11 (a) *Bare thermocouple*. (b) Termokopel yang telah diberi *cover* berupa pipa kapiler tembaga pada ujung sensornya.

Karena output dari termokopel berupa tegangan (mV), maka untuk membacanya digunakan data akuisisi. Data akuisisi yang digunakan ialah *National Instrument*. Alat ini harus digunakan berpasangan dengan modul *converter*-nya.



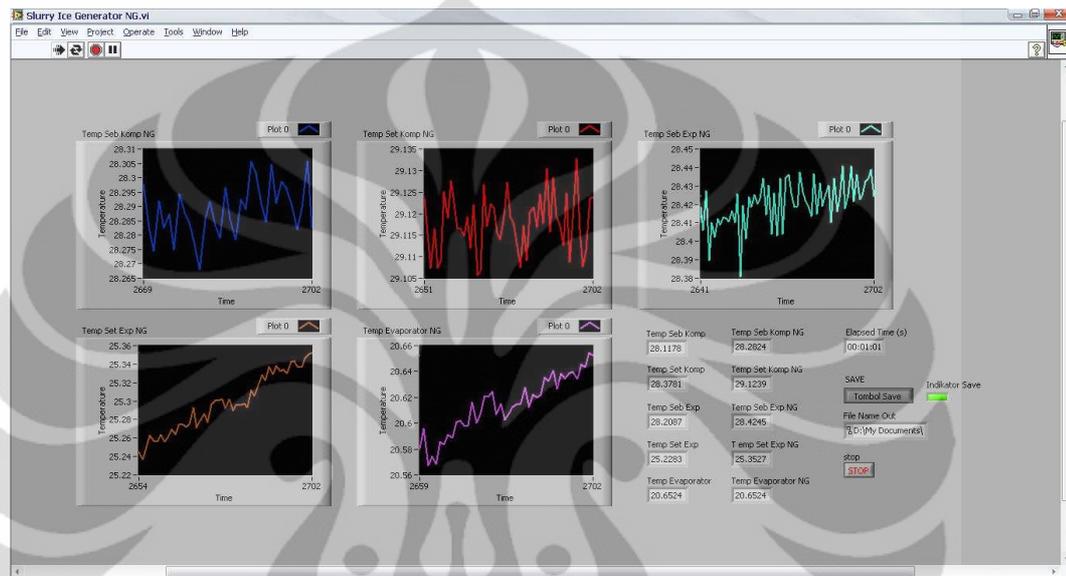
Gambar 3.12 Data akuisisi yang digunakan, yaitu DAQ produksi *National Instrument*.

Spesifikasi data akuisisi yang digunakan adalah sebagai berikut:

<i>Modul Name</i>	: <i>National Instrument NI 9174</i>
<i>Converter Name</i>	: <i>LabView 8.5</i>
<i>Input Range</i>	: <i>50 nA</i>
<i>Thermocouple Range</i>	: <i>J, K, T, E, N, B, R, S</i>
<i>Temperature Range</i>	: <i>Depend on Thermocouple</i>

Channel Number : 4
Output to PC : USB hub
Working Voltage : 0,08 Volt

Data akuisisi ini menggunakan *software* sebagai *interface* yang dioperasikan dengan menggunakan sistem operasi Windows XP yaitu LabView 8.5 untuk pengambilan data dan menghasilkan *output* berupa file notepad (.lvm).



Gambar 3. 13 Interface yang terdapat pada LabView 8.5.

III.3.8.2 Alat Ukur Tekanan

Tekanan pada titik-titik yang ditentukan diukur menggunakan *Pressure gauge*. Pengukuran dilakukan berdasarkan selisih antara tekanan mutlak dengan tekanan atmosfer. *Pressure gauge* yang digunakan dalam instalasi sistem ini berjumlah empat buah, yaitu dua buah *high pressure gauge* (0 – 35 bar atau 0 – 500 psi) dan dua buah *low pressure high* (0 – 17.5 bar atau 0 – 250 psi). *High pressure gauge* terpasang pada setelah kompresor dan sebelum alat ekspansi, sedangkan *low pressure gauge* dipasang pada sebelum kompresor dan setelah alat ekspansi. *Pressure gauge* yang digunakan ialah jenis tabung bourdon, yaitu perangkat perangkat yang terdiri dari pipa pegas melingkar dan pegas yang terbuat dari kuningan atau baja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 *Pressure gauge* yang digunakan dalam sistem.

III.3.8.3 Alat Ukur Kelistrikan

Untuk mengetahui besarnya arus listrik yang digunakan oleh kompresor, digunakan alat ukur, yaitu *clampmeter*. Pengukuran dilakukan dengan cara melingkari kabel tunggal dengan *clamp* dan pembacaan dilakukan dengan melihat tampilan pada display. *Clampmeter* yang digunakan ialah Krisbow model KW06-287.



Gambar 3. 15 *Clampmeter* yang digunakan untuk mengetahui arus kompresor.

III.3.8.4 Alat Ukur Putaran Motor

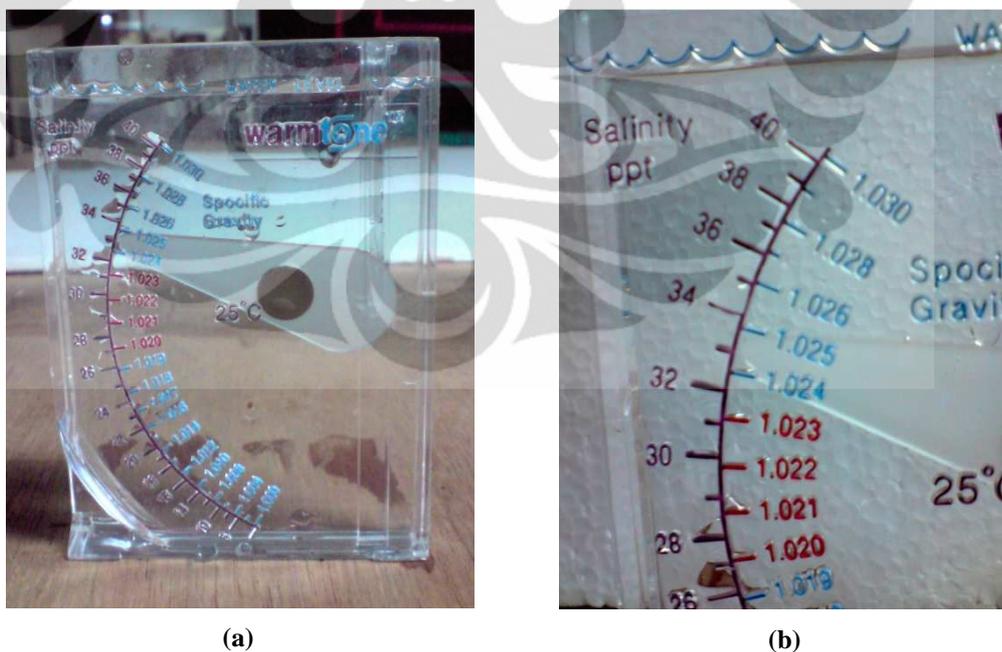
Putaran motor diukur menggunakan *tachometer* digital tipe non kontak yang dapat mengenali tanda pada benda yang bergerak. Tanda yang berupa stiker berwarna perak diletakkan pada sisi atas *pulley*. *Tachometer* akan mendeteksi putaran dari tanda yang berputar bersama *pulley* tersebut sehingga dapat diketahui putaran dari *auger shaft*. *Tachometer* yang digunakan merupakan produksi Ono Sokki tipe HT-4100 dengan batas pengukuran 30 – 50000 rpm.



Gambar 3. 16 Tachometer yang digunakan untuk mengukur putaran motor.

III.3.8.5 Alat Ukur Salinitas Air Laut

Nilai salinitas air laut diperlukan untuk mengetahui karakteristik dari air laut sebagai bahan baku pembuat *ice slurry*. Alat yang digunakan merupakan alat sederhana yang biasa digunakan untuk mengetahui salinitas pada akuarium air laut. Alat ukur yang digunakan merupakan *salinity hydrometer* produksi Warmtone dengan *range* pengukuran salinitas 0 – 40 ppt. Cara kerja alat ini ialah dengan menggunakan gaya apung yang membuat jarum penunjuk menunjuk ke indikator salinitas. Gambar 3.17 menunjukkan *salinity hydrometer* yang digunakan.



Gambar 3. 17 (a) *Salinity hydrometer* yang digunakan untuk mengetahui nilai salinitas air laut yang digunakan. (b) Jarum indikator menunjukkan salinitas sebesar 33 ppt dengan nilai *specific gravity* sebesar 1,0245.

III.4 PROSEDUR PENGAMBILAN DATA

Pengujian dan pengambilan data dilakukan di Laboratorium Refrigerasi lantai 3 Departemen Teknik Mesin FTUI. Prosedur pengambilan data menjelaskan langkah-langkah yang harus dilakukan untuk mendapatkan data-data yang sesuai. Sebelum menjalankan percobaan lakukan pengecekan pada sambungan kabel listrik dan tekanan sebelum operasi kompresor. Pastikan juga *gate valve* pada saluran tangki reservoir dengan tangki generator dan saluran keluar *ice slurry* pada tangki generator dalam keadaan tertutup. Prosedur pengambilan data yang dilakukan ialah sebagai berikut:

1. Siapkan perlengkapan dan peralatan yang akan digunakan.
2. Isi tangki reservoir dengan bahan baku air laut sejumlah kapasitas yang diinginkan.
3. Refrigerant terisi dengan tekanan sebelum operasi ± 150 psi.
4. DAQ (NI 9174) terhubung pada komputer, buka program LabView 8.5 yang telah dibuat dan pastikan setiap termokopel terhubung pada pin yang tepat sesuai dengan yang dihubungkan di DAQ.
5. Nyalakan sumber tegangan dan arus di *panel box*.
6. Nyalakan sistem refrigerasi dengan cara memutar saklar yang ada di *panel box*, dimulai dengan kipas kondenser lalu kemudian kompresor. Apabila keduanya berjalan maka lampu indikator pada *panel box* akan menyala.
7. Alirkan air laut dari tangki reservoir ke tangki generator dengan cara memutar tuas *gate valve*.
8. Setelah tekanan dan temperatur stabil (sekitar 3 menit), mulailah mengambil data dengan cara mengklik "Tombol Save" pada *interface* LabView 8.5. Data temperatur akan otomatis tercatat secara berkala.
9. Catat parameter tekanan pada setiap titik dengan cara membaca *pressure gauge* secara manual setiap 5 menit sekali.
10. Lingkarkan *clampmeter* pada salah satu kabel yang menghubungkan kompresor dengan *panel box* untuk membaca arus yang dipakai kompresor setiap 5 menit sekali.
11. Catat juga data tegangan yang terbaca di indikator tegangan pada *panel box* setiap 5 menit sekali.

12. Apabila temperatur air laut sudah mencapai suhu 10°C , maka motor dinyalakan dengan terlebih dahulu diatur kecepatannya menggunakan *switch* yang ada di *panel box*. Gunakan putaran motor ± 125 rpm (putaran motor diatas 125 rpm dapat menyebabkan getaran berlebih pada *ice slurry generator*). Gunakan *tachometer* untuk memastikan putaran motor.
13. Apabila suhu air laut di dalam evaporator telah menunjukkan tren *steady* dan sudah mencapai -2.5°C maka hentikan percobaan dan keluarkan *ice slurry* yang telah jadi dengan cara memutar tuas *gate valve* pada saluran keluar *ice slurry* di tangki generator.
14. Jika terdapat hal-hal yang tidak diinginkan, hentikan kerja *ice slurry generator* dengan cara menekan tombol *emergency stop button*.

III.5 VARIASI PENGAMBILAN DATA

Penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui pada kapasitas berapakah sistem *ice slurry* berada pada performa optimal. Variabel yang tetap disini ialah konsentrasi dari air laut dan mode *setting-an* pada sistem refrigerasi dan sistem mekanik, sementara variasi dilakukan dengan merubah jumlah (volume) bahan baku yang digunakan dalam pembuatan *ice slurry*. Volume yang digunakan untuk bahan baku ialah 5 liter, 7 liter, 9 liter, dan 10 liter. Percobaan juga dilakukan dengan variasi waktu yang berbeda, yaitu pada siang dan malam hari. Hal ini dilakukan karena karena terdapat perbedaan temperatur lingkungan pada waktu yang berbeda, dimana temperatur rata-rata pada siang hari ialah $27,35^{\circ}\text{C}$ dan temperatur rata-rata pada malam hari ialah $26,325^{\circ}\text{C}$. Selain itu adanya trend data daya listrik yang lebih besar pada waktu malam hari dibandingkan pada waktu siang hari dengan *setting-an* sistem refrigerasi yang sama.

BAB IV

DATA, PENGOLAHAN, DAN ANALISIS

Tujuan penelitian ini ialah untuk mengetahui pada jumlah bahan dasar berapakah *ice slurry generator* dapat berkerja secara optimal. Apakah jumlah bahan dasar (volume air laut) yang digunakan untuk membuat *ice slurry* mempengaruhi performa dari sistem refrigerasi *ice slurry generator* dan apakah waktu yang diperlukan untuk memproduksi *ice slurry* akan berbanding lurus dengan jumlah volume bahan dasar yang digunakan? Untuk itu maka penulis melakukan pengambilan data dengan jumlah volume bahan baku *ice slurry*, berupa air laut, yang dibedakan, yaitu pada volume 5 liter, 7 liter, 9 liter dan 10 liter. Selain itu akan dibandingkan juga hasil yang diperoleh dengan waktu pengerjaan yang berbeda, yaitu siang (temperatur lingkungan 26,325 °C) dan malam hari (temperatur lingkungan 27,35 °C).

Ice slurry generator selalu difungsikan dengan *setting* sistem refrigerasi dan mekanik yang tetap ketika dilakukan pengambilan data. Motor selalu dioperasikan dengan putaran yang tetap (sekitar 125 rpm) dan posisi bukaan katup ekspansi (*needle valve*) tidak dirubah-rubah selama pengambilan data berlangsung dengan derajat bukaan (*throttle*) yang sama untuk setiap variasi jumlah volume bahan dasar air laut.

IV. 1 PENGOLAHAN DATA

IV. 1. 1 Titik Beku Air Laut

Titik beku air laut digunakan sebagai parameter lama waktu produksi *ice slurry*. Seperti yang telah dipaparkan sebelumnya, titik beku air laut merupakan fungsi dari salinitas dan tekanan air laut. Berdasarkan alat ukur salinitas, salinitas benda uji ialah sebesar 33 ppt dengan tekanan sebesar 1,01325 bar (evaporator tidak tertutup rapat). Titik beku air laut dapat diestimasi menggunakan persamaan (2.9) dan didapatkan titik beku air laut benda uji ialah sebesar -1.815 °C.

IV. 1. 2 Perhitungan COP Sistem Refrigerasi

Sesuai prosedur penelitian, data diambil setelah parameter-parameter fisik yang berhubungan dengan sistem telah stabil. Pengambilan data dilakukan secara kontinu mulai saat parameter fisik telah stabil hingga temperatur air laut telah mencapai $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Perhitungan COP sistem refrigerasi *ice slurry generator*, membutuhkan data parameter fisik seperti temperatur, tekanan, arus kompresor, dan tegangan kompresor. Proses pengambilan data tekanan, arus, dan tegangan yang mengalir pada kompresor diambil setiap 5 menit sekali sementara data akuisisi mencatat nilai temperatur setiap detik. Data temperatur dan tekanan yang diambil ialah data refrigerant, yaitu temperatur masuk kompresor (T_1) dan tekanan masuk kompresor (P_1), temperatur keluar kompresor (T_2) dan tekanan keluar kompresor (P_2), temperatur masuk ekspansi (T_3) dan tekanan masuk ekspansi (P_3), dan temperatur keluar ekspansi (T_4) dan tekanan keluar ekspansi (P_4). Tabel 4.1 menunjukkan nilai rata-rata dari tekanan dan temperatur yang tercatat, sementara Tabel 4.2 menunjukkan nilai rata-rata arus dan tegangan kompresor serta waktu produksi *ice slurry*.

Tabel 4. 1 Data tekanan dan temperatur rata-rata untuk setiap variasi jumlah bahan baku pembuat *ice slurry*.

Volume		5 Liter	7 Liter	9 Liter	10 Liter	
S i a n g	Masuk Kompresor (1)	P (kPa)	193.54	200.15	203.98	199.73
		T ($^{\circ}\text{C}$)	-12.09	-2.96	-3.67	-1.05
	Keluar Kompresor (2)	P (kPa)	1243.27	1251.89	1215.98	1223.29
		T ($^{\circ}\text{C}$)	67.15	71.66	72.69	74.53
	Masuk Ekspansi (3)	P (kPa)	1200.18	1191.56	1187.25	1187.25
		T ($^{\circ}\text{C}$)	28.56	28.40	27.92	27.74
	Keluar Ekspansi (4)	P (kPa)	218.10	220.69	222.37	215.72
		T ($^{\circ}\text{C}$)	-23.02	-22.68	-22.56	-23.25
M a l a m	Masuk Kompresor (1)	P (kPa)	188.99	201.30	199.77	203.43
		T ($^{\circ}\text{C}$)	-5.84	-7.12	-1.15	1.10
	Keluar Kompresor (2)	P (kPa)	1214.34	1217.41	1202.57	1219.26
		T ($^{\circ}\text{C}$)	68.27	73.22	72.51	71.77
	Masuk Ekspansi (3)	P (kPa)	1177.40	1187.25	1193.00	1184.79
		T ($^{\circ}\text{C}$)	27.50	27.62	300.16	27.50
	Keluar Ekspansi (4)	P (kPa)	205.73	215.95	213.94	214.92
		T ($^{\circ}\text{C}$)	-24.44	-23.25	-23.49	-23.37

Tabel 4. 2 Data arus dan tegangan kompresor rata-rata untuk setiap variasi jumlah bahan baku pembuat *ice slurry* serta waktu produksi yang dibutuhkan.

	Volume (Liter)	Arus Kompresor (A)	Tegangan Kompresor (V)	Waktu Produksi (Menit)
S i a n g	5	2.10	200	77
	7	2.08	200	78
	9	2.21	200	88
	10	2.15	200	103
M a l a m	5	2.01	210	67
	7	2.11	210	75
	9	2.12	210	88
	10	2.14	210	100

Setelah semua data terkumpul, dilakukan pengolahan data dengan menggunakan software MATLAB. Pengolahan menggunakan software MATLAB dilakukan dengan algoritma sebagai berikut.

1. Dengan data temperatur dan tekanan di setiap titik yang telah dicatat. Nilai entalphi dari tiap titik dapat dicari menggunakan software REFPROP yang terintegrasi langsung dengan MATLAB.
2. Menghitung kerja yang dilakukan kompresor dengan menggunakan persamaan (2.3).
3. Menghitung laju aliran massa refrigerant dalam sistem menggunakan persamaan (2.8).
4. Menghitung besarnya kalor yang diserap refrigerant pada evaporator (tangki generator) menggunakan persamaan (2.2).
5. Menghitung nilai coefficient of performance dari sistem refrigerasi ice slurry generator menggunakan persamaan (2.6).

Dengan algoritma yang telah dipaparkan di atas, kemudian dibuatlah m-file (terlampir) agar program dapat berjalan. Dengan program MATLAB tersebut, penulis hanya tinggal memasukan nilai temperatur dan tekanan di setiap titik serta arus dan tegangan yang dibutuhkan kompresor selama pengambilan data berlangsung. Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengerjaan MATLAB untuk data jumlah bahan dasar sebanyak 5 liter siang hari.

```

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 261.06
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 193.54
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 340.30
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1243.27
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 301.71
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1200.18
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 250.13
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 218.10
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.10
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 200.00

cos_phi =

    0.9800

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =

ans =

    403.4720    445.0210    234.7848    234.7848

Nilai Kerja Kompresor = 412 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.00991 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.67e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.06
=====
>>

```

Gambar 4. 1 Hasil pengerjaan MATLAB untuk data jumlah bahan dasar 5 liter siang hari.

Dengan cara yang sama, data pada variasi jumlah bahan baku sebesar 7 liter, 9 liter, dan 10 liter baik siang maupun malam juga diolah menggunakan MATLAB. Tabel 4.3 menunjukkan nilai entalpi dari setiap titik di sistem dan Tabel 4.4 menunjukkan nilai COP untuk variasi jumlah bahan baku *ice slurry* yang berbeda.

Tabel 4. 3 Nilai entalpi di setiap titik untuk variasi jumlah bahan baku *ice slurry* yang berbeda.

Volume		5 Liter	7 Liter	9 Liter	10 Liter	
S i a n g	Masuk Kompresor (1)	P (kPa)	193.54	200.15	203.98	199.73
		T (°C)	-12.09	-2.96	-3.67	-1.05
		h (kJ/kg)	403.46	409.3	408.75	410.55
	Keluar Kompresor (2)	P (kPa)	1243.27	1251.89	1215.98	1223.29
		T (°C)	67.15	71.66	72.69	74.53
		h (kJ/kg)	445.02	448.61	449.89	451.3
	Masuk Ekspansi (3)	P (kPa)	1200.18	1191.56	1187.25	1187.25
		T (°C)	28.56	28.40	27.92	27.74
		h (kJ/kg)	234.78	234.58	233.97	233.74
	Keluar Ekspansi (4)	P (kPa)	218.10	220.69	222.37	215.72
		T (°C)	-23.02	-22.68	-22.56	-23.25
		h (kJ/kg)	234.78	234.58	233.97	233.74

Lanjutan Tabel 4.3

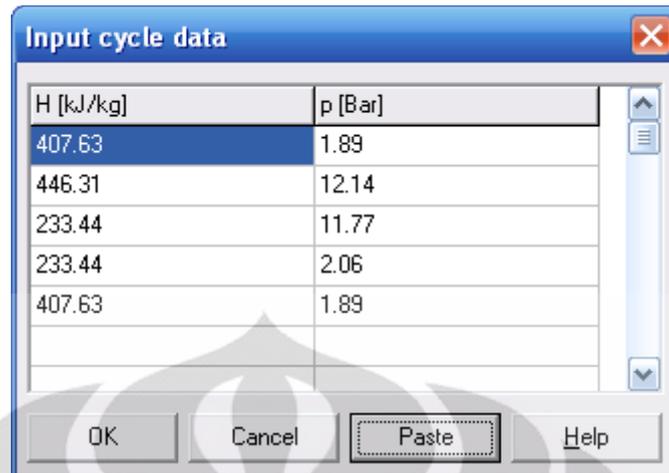
M a l a m	Masuk Kompresor (1)	P (kPa)	188.99	201.30	199.77	203.43
		T (°C)	-5.84	-7.12	-1.15	1.10
		h (kJ/kg)	407.63	406.55	410.48	411.91
	Keluar Kompresor (2)	P (kPa)	1214.34	1217.41	1202.57	1219.26
		T (°C)	68.27	73.22	72.51	71.77
		h (kJ/kg)	446.31	450.31	449.9	449.1
	Masuk Ekspansi (3)	P (kPa)	1177.40	1187.25	1193.00	1184.79
		T (°C)	27.50	27.62	300.16	27.50
		h (kJ/kg)	233.44	233.59	232.82	233.44
	Keluar Ekspansi (4)	P (kPa)	205.73	215.95	213.94	214.92
		T (°C)	-24.44	-23.25	-23.49	-23.37
		h (kJ/kg)	233.44	233.59	232.82	233.44

Tabel 4.4 Hasil pengolahan data menggunakan MATLAB.

Volume		5 Liter	7 Liter	9 Liter	10 Liter
S i a n g	m dot (kg/s)	0.00991	0.0104	0.0105	0.0103
	W _C (Watt)	412	408	433	421
	Q _E (Watt)	1.67 x 10 ³	1.81 x 10 ³	1.83 x 10 ³	1.83 x 10 ³
	COP	4.06	4.44	4.25	4.34
M a l a m	m dot (kg/s)	0.0107	0.00992	0.0111	0.0118
	W _C (Watt)	414	434	436	440
	Q _E (Watt)	1.86 x 10 ³	1.72 x 10 ³	1.97 x 10 ³	2.11 x 10 ³
	COP	4.5	3.95	4.51	4.80

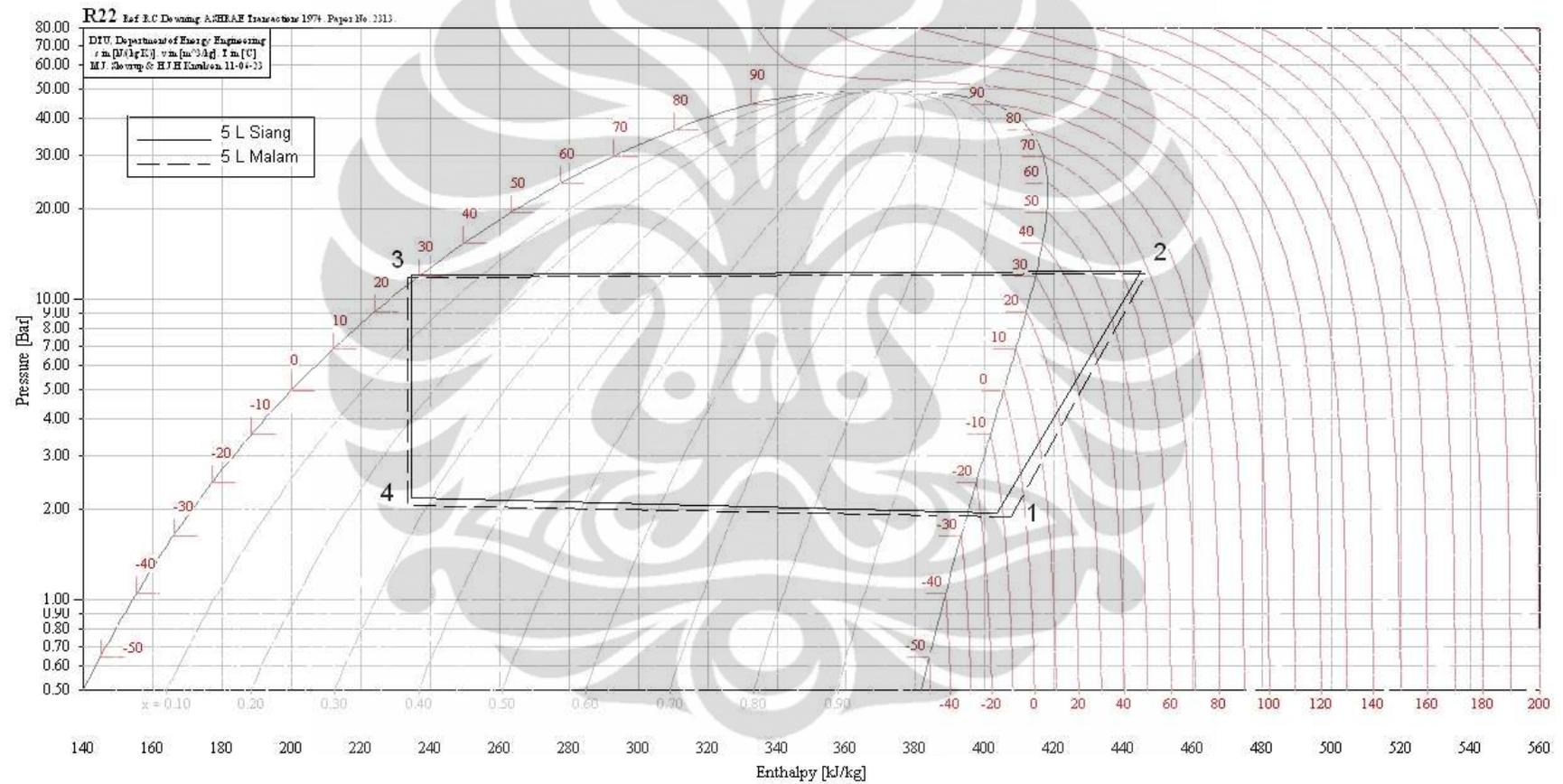
IV. 1. 3 Pemetaan Siklus pada Diagram P – H

Performa sistem refrigerasi juga dapat dilihat melalui diagram p-h-nya. Diagram ini mampu menampilkan kondisi *refrigerant* dalam berbagai status termodinamik sebagai titik atau garis yang dipetakan. Untuk memetakan siklus pada diagram p-h ini memerlukan data tekanan dan entalpi dari setiap titik pada sistem. Melalui pengolahan data pada subbab sebelumnya, maka didapatkan nilai entalpi setiap titik dari sistem untuk selanjutnya di-plot pada diagram p-h untuk *refrigerant* jenis R22. Pemetaan siklus pada diagram p-h menggunakan bantuan software COOLPACK dan langsung di-input seperti terlihat pada Gambar 4.2 di bawah.

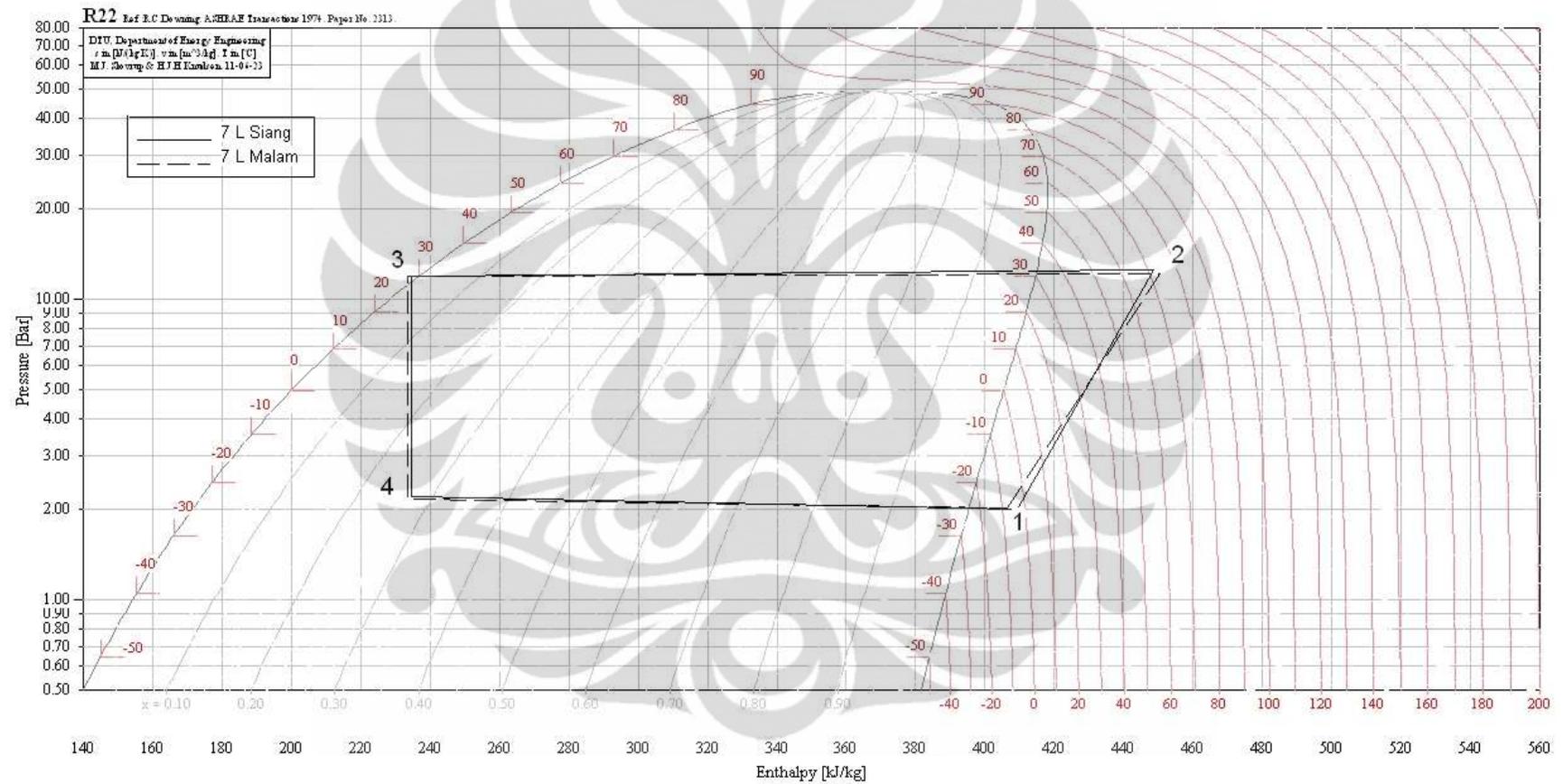


Gambar 4. 2 Input data tekanan dan entalpi pada software COOLPACK.

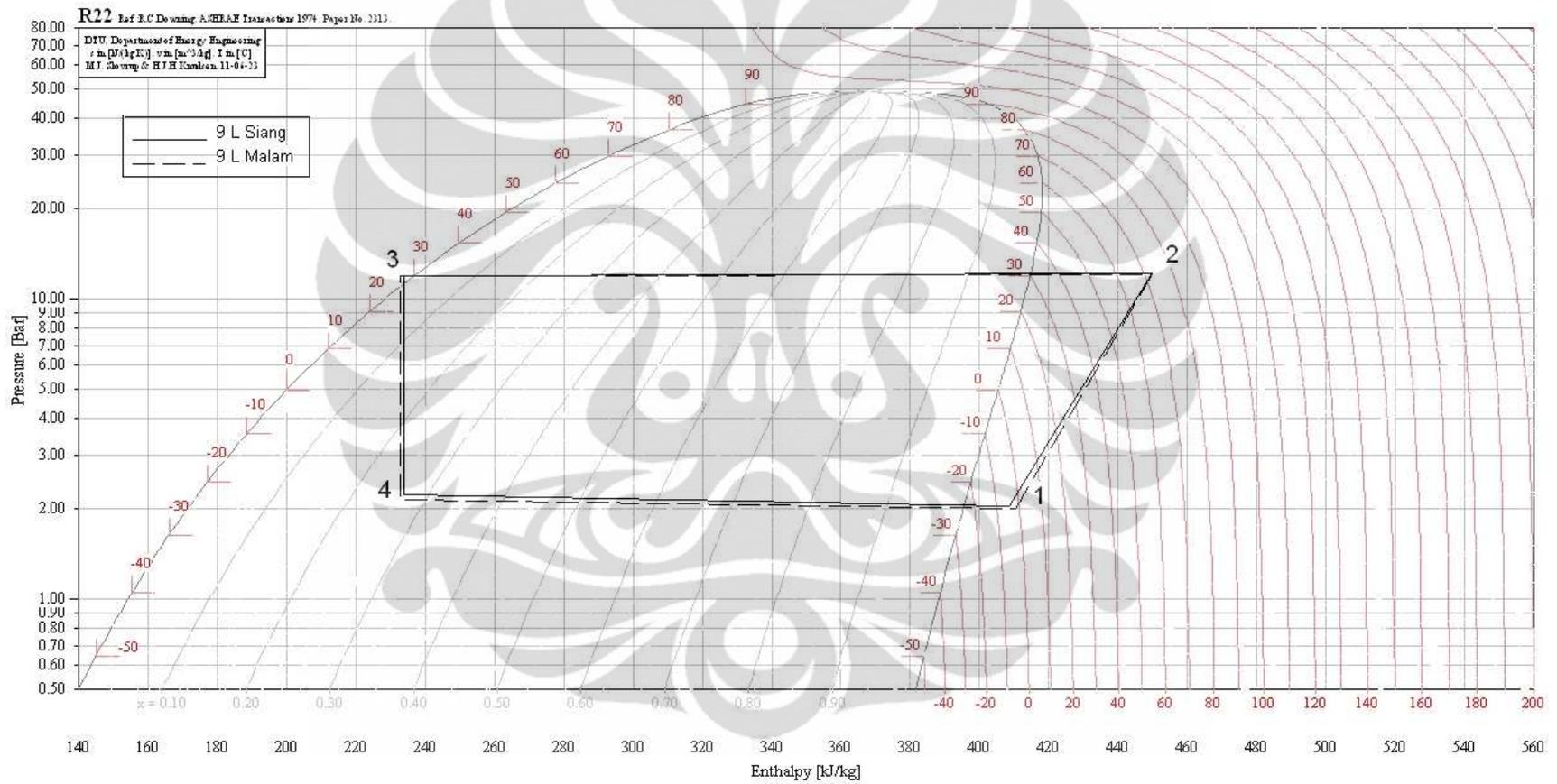
Nilai input yang dimasukkan pada software COOLPACK ialah berupa tekanan dan hasil perhitungan entalpi pada titik 1 (masuk kompresor), titik 2 (keluar kompresor), titik 3 (masuk ekspansi), dan titik 4 (keluar ekspansi). Gambar 4.2 menunjukkan input cycle data untuk variasi jumlah bahan dasar sebanyak 5 liter siang hari. Hal yang sama dilakukan juga untuk variasi jumlah bahan dasar lainnya sehingga didapatkan perbandingan pemetaan siklus diagram p-h untuk variasi pengerjaan siang dan malam untuk 5 liter, 7 liter, 9 liter dan 10 liter seperti yang ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5, dan Gambar 4.6 di bawah. Sementara perbandingan pemetaan siklus untuk variasi jumlah bahan dasar untuk pengerjaan siang dan malam diperlihatkan berturut-turut pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 di bawah.



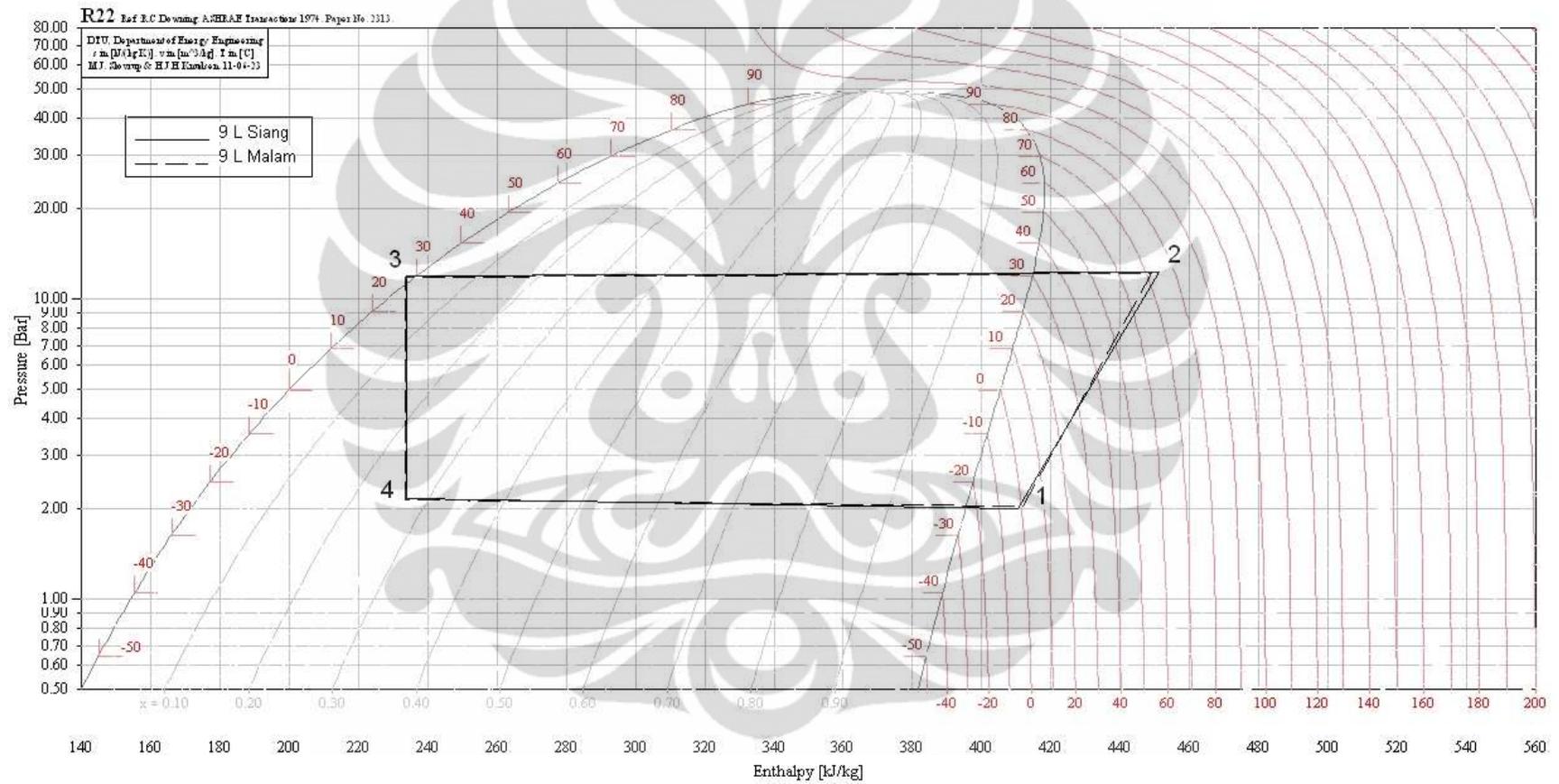
Gambar 4. 3 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 5 liter variasi waktu pengerjaan siang (27,4 °C) dan malam hari (26,2 °C).



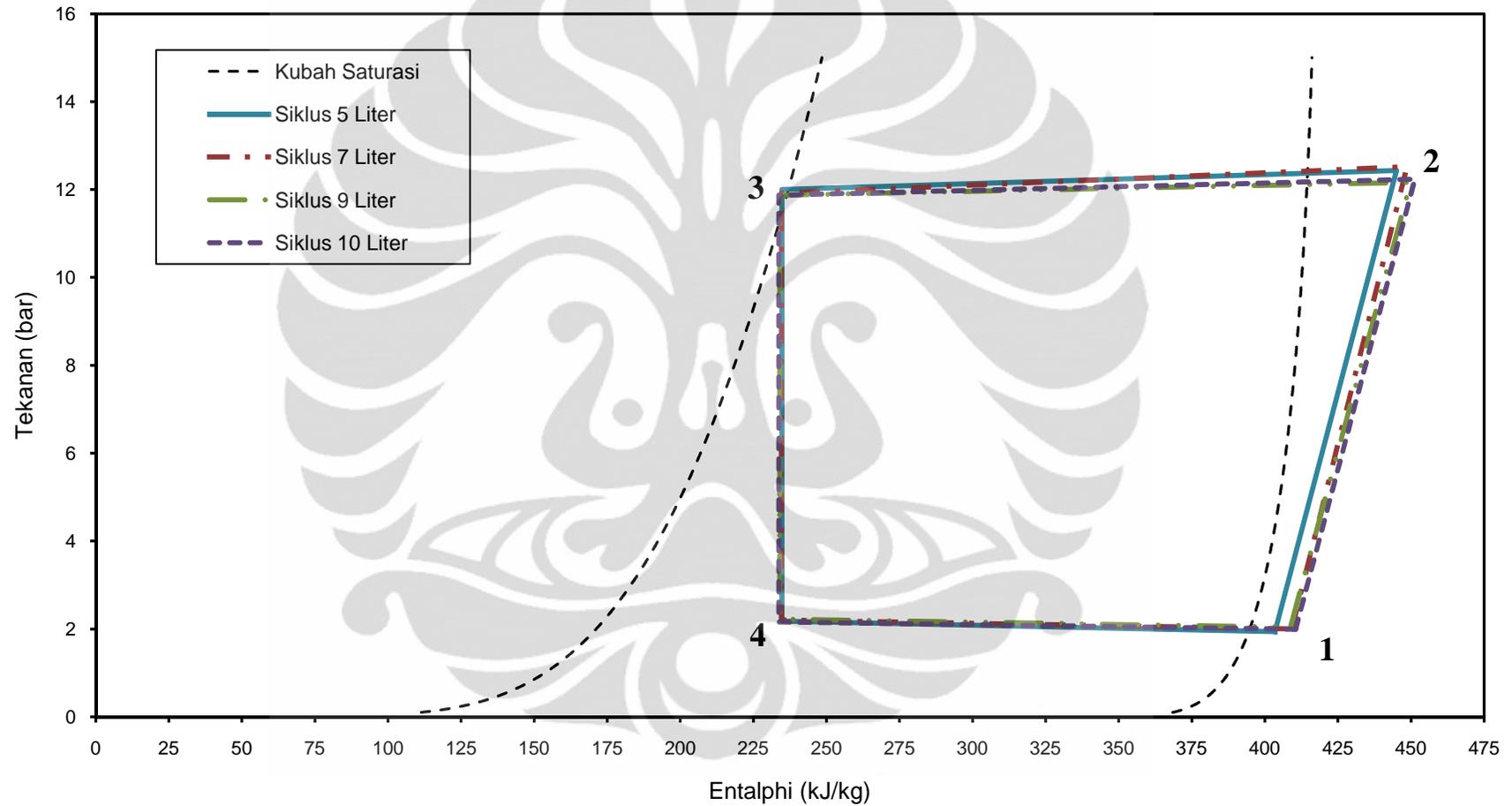
Gambar 4. 4 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 7 liter variasi waktu pengerjaan siang (27,4 °C) dan malam hari (26,2 °C).



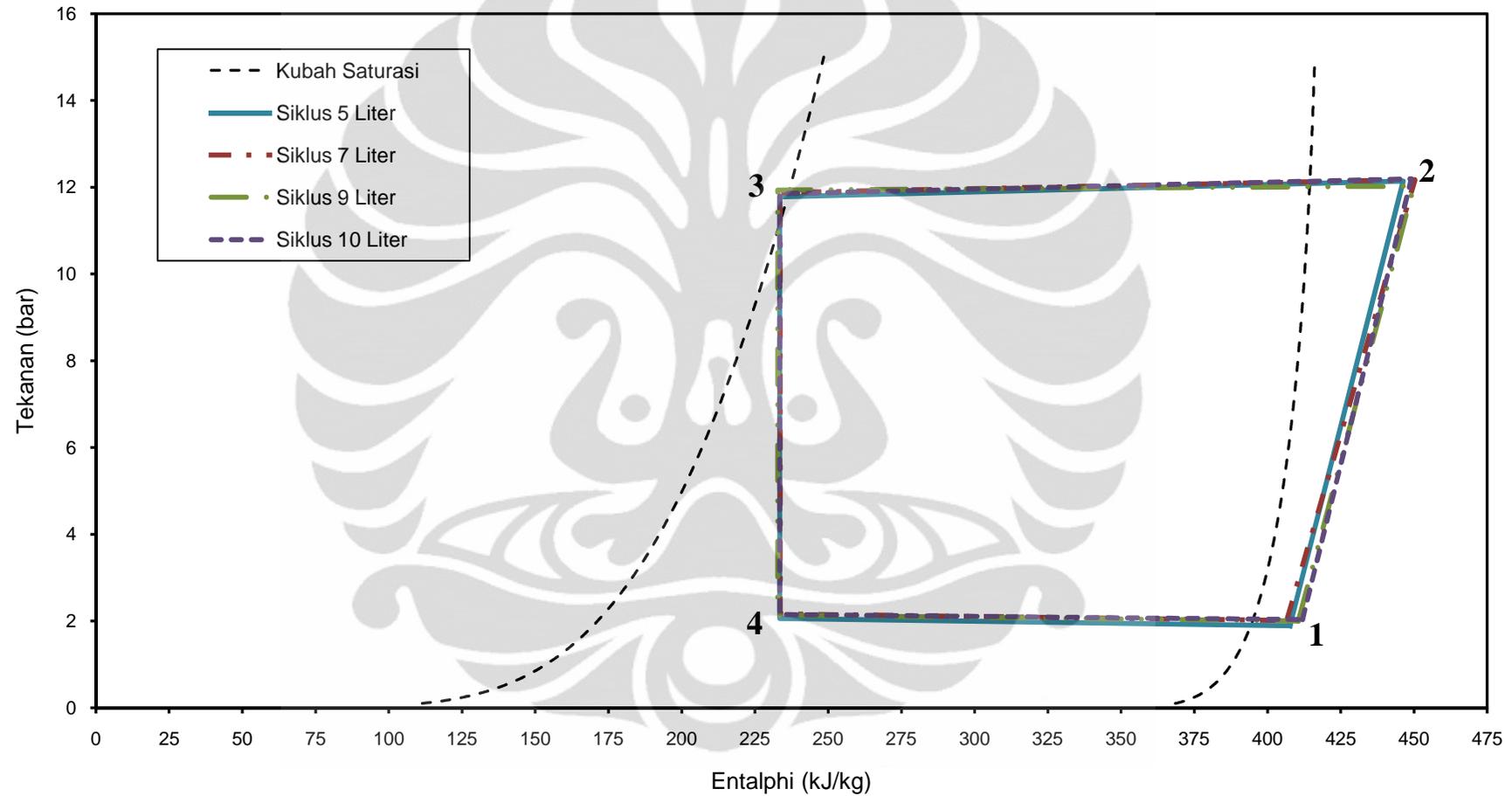
Gambar 4. 5 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 9 liter variasi waktu pengerjaan siang (27,4 °C) dan malam hari (26,4 °C).



Gambar 4. 6 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 10 liter variasi waktu pengerjaan siang (27,2 °C) dan malam hari (26,5 °C).



Gambar 4. 7 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk pengerjaan siang hari dengan variasi jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 5, 7, 9, dan 10 liter.



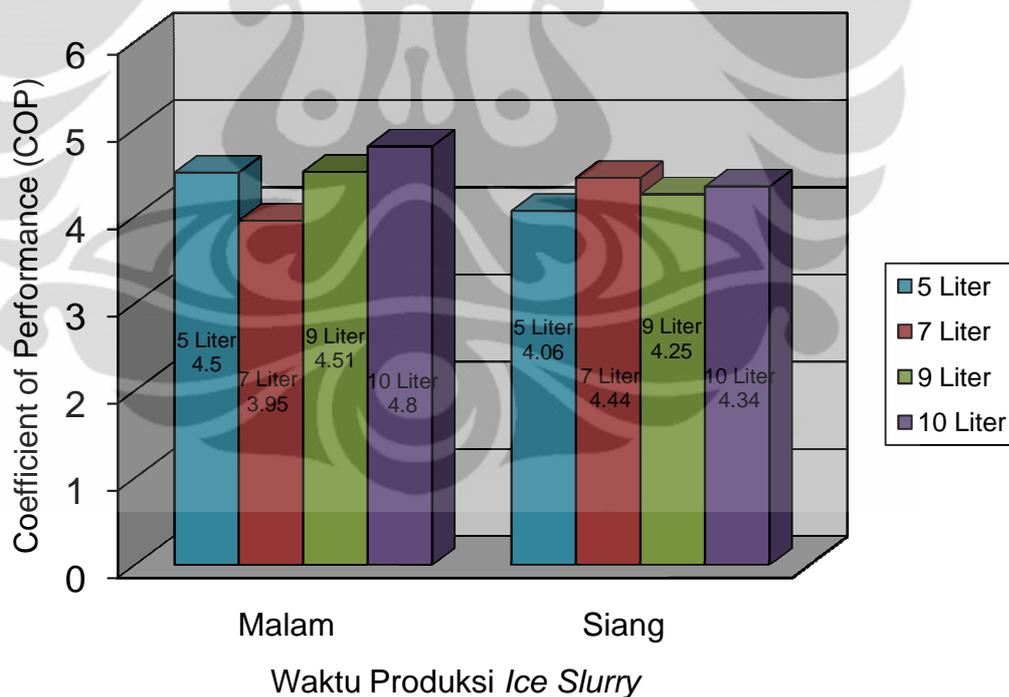
Gambar 4. 8 Perbandingan pemetaan siklus sistem refrigerasi *ice slurry generator* untuk pengerjaan malam hari dengan variasi jumlah bahan dasar pembentuk *ice slurry* sebanyak 5, 7, 9, dan 10 liter.

IV. 2 ANALISIS HASIL PENGOLAHAN DATA

Pada subbab ini akan dianalisis sistem refrigerasi dari *ice slurry generator* berdasarkan hasil pengolahan data berupa analisis COP sistem, diagram p-h-nya, waktu produksi, dan analisis setiap komponen yang dianggap penting.

IV. 2. 1 Analisis COP Sistem

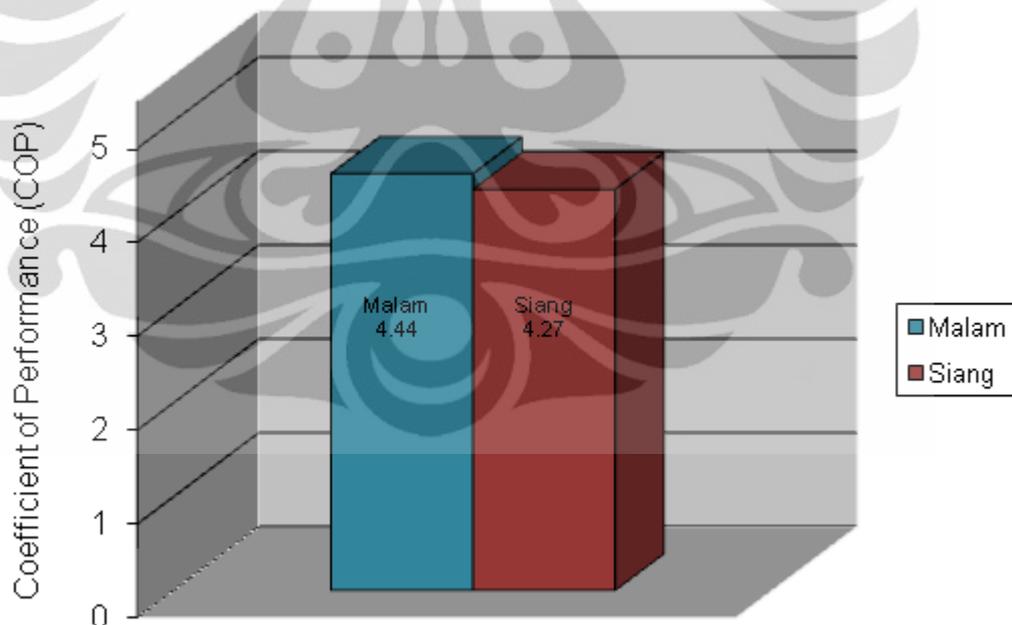
Kualitas unjuk kerja suatu sistem refrigerasi dapat dinyatakan dengan suatu angka, COP, yaitu hasil perbandingan antara energi yang diserap dari bahan baku (air laut) dengan energi yang digunakan untuk mengkompresi *refrigerant* di kompresor. Berdasarkan hasil pengolahan data pada sub bab sebelumnya, didapatkan nilai COP yang berbeda untuk setiap jumlah bahan baku air laut yang berbeda pula. Perbandingan nilai COP tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.9 di bawah.



Gambar 4. 9 Perbandingan COP untuk setiap variasi jumlah bahan dasar air laut dan variasi waktu pengerjaan.

Sistem refrigerasi *ice slurry generator* berbahan dasar air laut ini memiliki nilai COP rata-rata 4.35. Bila dibandingkan dengan nilai COP sistem refrigerasi komersil kebanyakan, yaitu $COP \approx 3$, maka dapat dikatakan bahwa sistem

refrigerasi *ice slurry generator* berbahan dasar air laut ini sudah cukup efisien. Pada Gambar 4.9, terdapat penyimpangan pada siklus 7 liter baik siang dan malam hari. Namun apabila melihat trend pada siklus 5 liter, 6 liter, dan 10 liter, semakin banyak beban pendinginan, maka akan semakin besar nilai COP sistem. Hal ini mungkin terjadi karena semakin besar beban pendinginan, maka refrigerant akan menyerap lebih banyak kalor yang menyebabkan perbedaan temperatur antara refrigerant yang masuk dengan refrigerant yang keluar evaporator akan semakin besar yang menyebabkan perbedaan entalpi antara sisi masuk dan keluar makin besar yang akhirnya akan memperbesar efek pendinginan. Selain itu besarnya aliran masa yang mengalir pada sistem akan meningkat seiring meningkatnya beban pendinginan. Apabila dibandingkan nilai COP *ice slurry generator* antara siklus malam hari dan siang hari seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, maka sistem akan memiliki performa yang lebih baik apabila dijalankan saat di malam hari. Perbedaan nilai COP ini mencapai angka 0,17.



Gambar 4. 10 Perbandingan COP untuk variasi waktu pengerjaan.

Dugaan awal mengapa siklus malam hari dapat memiliki nilai COP yang lebih besar ialah karena temperatur lingkungan yang lebih rendah di saat malam hari. Hal ini akan dianalisis lebih mendalam dalam sub bab berikutnya, yaitu analisis diagram p-h.

IV. 2. 2 Analisis Diagram P-H

Representasi secara grafikal tentang siklus refrigerasi ini memungkinkan penulis untuk dapat mempertimbangkan secara simultan semua perubahan yang dapat terjadi pada *refrigerant* dan akibat yang dapat ditimbulkannya selama proses berlangsung. Diagram p-h untuk setiap variasi data memiliki bentuk yang berbeda satu sama lain. Hal ini diakibatkan adanya perbedaan beban pendinginan dan parameter fisik lingkungan yang selalu berubah.

Berdasarkan diagram p-h di atas, dapat dilihat komponen apa pada sistem refrigerasi yang memiliki masalah. Seluruh diagram p-h di atas menunjukkan semua komponen yang terdapat dalam sistem refrigerasi *ice slurry generator* berfungsi secara baik. Kompresor 1,5 HP yang digunakan mampu mengompresi *refrigerant* dengan rasio kompresi rata-rata 6,15. Kondenser juga dapat berfungsi dengan baik karena mampu merubah fase *refrigerant* menjadi cair secara keseluruhan sebelum *refrigerant* diekspansi setelahnya. Hal ini dapat mencegah terjadinya gelembung-gelembung gas yang dapat menghalangi aliran *refrigerant* melalui katup ekspansi. Alat ekspansi berfungsi dengan baik karena mampu menurunkan tekanan secara drastis tanpa adanya penyumbatan dan tekanan yang dihasilkan cukup stabil. Evaporator juga berfungsi dengan baik karena *refrigerant* yang meninggalkan evaporator semuanya dalam fase gas. Hal ini penting karena jika *refrigerant* yang melalui kompresor masih dalam fase cair maka dapat merusak kompresor.

Tidak seperti siklus kompresi uap satu tingkat ideal pada umumnya, terdapat beberapa perbedaan antara hasil pemetaan siklus keseluruhan sistem *ice slurry generator* (Gambar 4.3 sampai Gambar 4.8) dengan siklus idealnya. Pertama ialah adanya tingkat kecuraman pada alur 2-3 dan alur 4-1. Alur 2-3 dan alur 4-1 yang seharusnya lurus sempurna, memiliki tingkat kecuraman yang disebabkan oleh adanya *pressure drop* dalam sistem dimana pada sistem aktual, *pressure drop* tak dapat dihindari. *Pressure drop* yang terjadi dapat disebabkan beberapa hal diantaranya ialah gesekan dalam pipa dan aliran *refrigerant*.

Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.6 menunjukkan bahwa produksi *ice slurry* yang dilakukan di malam hari memiliki karakteristik diagram p-h yang lebih baik. Sebagai contoh pada siklus 9 liter malam, kompresor mampu

mengompresi *refrigerant* hingga tekanan 12,03 bar dan dengan *pressure drop* sebesar 0,1 bar menghasilkan tekanan jenuh gas sebesar 11,93 bar. Bila dibandingkan dengan tekanan saturasi siklus 9 liter siang yang hanya sebesar 11,87 bar mengakibatkan suhu kondensasi *refrigerant* pada siklus 9 liter siang memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan siklus 9 liter malam. Hal ini mempengaruhi derajat *subcooling* kedua siklus tentunya dimana siklus yang memiliki suhu kondensasi tertinggi akan memiliki efisiensi dan performa yang lebih baik. Pada siklus 9 liter malam, suhu kondensasi *refrigerant* ialah sebesar 30,036 °C, sementara pada siklus 9 liter siang, suhu kondensasi *refrigerant* ialah sebesar 29,843 °C. Performa siklus juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan tempat *ice slurry generator* berkeja. Karena kondenser yang digunakan merupakan jenis *air cooled condenser*, maka makin rendah temperatur lingkungan maka akan semakin besar kapasitas pembuangan panas *refrigerant* ke lingkungan sekitarnya. Dikarenakan temperatur lingkungan pada malam hari lebih rendah dibandingkan temperatur lingkungan pada saat siang hari maka tentu saja performa siklus akan lebih baik pada pengerjaan malam hari. Berdasarkan data yang didapatkan, derajat *subcooling* pada siklus 9 liter malam hari ialah sebesar 3,03 °C dan derajat *subcooling* pada siklus 9 liter siang hari hanya sebesar 1,93 °C. Hal ini tentunya menambah muatan energi yang terkandung dalam *refrigerant* pada siklus 9 liter malam lebih baik. Hal yang serupa juga terjadi pada siklus pengerjaan malam lainnya. Sesuai tujuan aplikasi *ice slurry generator* yang nantinya akan diletakan di daerah pantai yang memiliki perbedaan temperatur siang dan malam hari yang sangat ekstrim, pastinya akan lebih mempengaruhi kinerja dan performa sistem refrigerasi *ice slurry generator*.

Selain itu nilai derajat *superheating* pada siklus malam hari secara umum juga memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan siklus siang hari. Nilai derajat *subcooling* dan *superheating* yang lebih baik ini juga mempengaruhi nilai COP. Hal ini menjadi jawaban mengapa nilai COP sistem refrigerasi pengerjaan malam hari memiliki nilai yang lebih baik.

Sementara bila dibandingkan antara keempat variasi jumlah bahan dasar air laut pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8, data siklus dengan jumlah bahan dasar air laut terbanyak, yaitu 10 liter, baik pengerjaan siang dan malam hari, memiliki

karakteristik diagram p-h yang lebih baik. Namun hal ini tak serta merta dapat disimpulkan bahwa semakin besar kapasitas air laut, maka akan semakin bagus karakteristik diagram p-h-nya. Terdapat penyimpangan di siklus 7 liter malam dan 7 liter siang. Namun, apabila dilihat pada trend siklus 5 liter, 7 liter dan 10 liter baik pengerjaan siang dan malam, maka kesimpulan awal semakin besar beban pendinginan akan semakin baik karakteristik diagram p-h-nya sehingga akan membaik juga nilai COP-nya.

IV. 2. 3 Analisis Waktu Produksi

Sistem *ice slurry generator* hasil modifikasi sistem sebelumnya yang telah ada, mampu menghasilkan *ice slurry* berbahan dasar air laut dengan rata-rata waktu produksi selama 85 menit ($\pm 1,4$ jam). *Ice slurry* dihasilkan dengan temperatur sebesar $-2,5$ °C di bawah temperatur titik bekunya yang sebesar $-1,815$ °C. Gambar 4.11 menunjukkan bentuk *ice slurry* yang dapat dihasilkan.

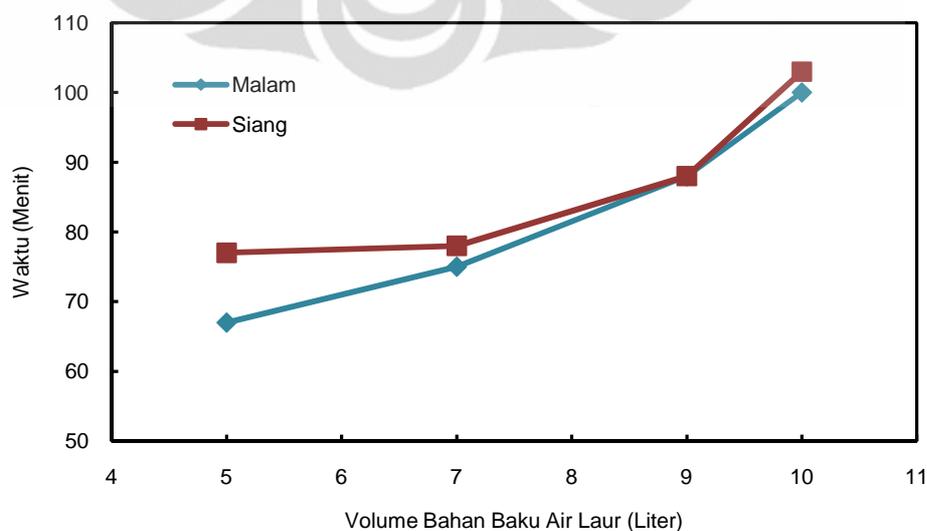


Gambar 4. 11 *Ice slurry* yang dihasilkan.

Waktu pembentukan *ice slurry* berbahan dasar air laut ini sendiri juga berbeda-beda untuk setiap variasi data. Gambar 4.12 menunjukkan grafik waktu produksi versus banyaknya bahan dasar yang digunakan untuk membuat *ice slurry*. Pada diagram tersebut terlihat jelas bahwa jumlah bahan dasar *ice slurry* berupa air laut berbanding lurus dengan lama waktu produksi yang dibutuhkan. Semakin banyak jumlah bahan dasar yang digunakan maka akan semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk membentuk *ice slurry*. Namun dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa untuk tingkat kecuraman dari jumlah 9 liter ke jumlah 10 liter lebih curam dibandingkan dengan tingkat kecuraman dari 5 liter ke 7 liter dan dari

7 liter ke 9 liter. Hal ini mengindikasikan penambahan waktu produksi *ice slurry* dari 9 liter dan 10 liter (13,5 menit) cukup besar dibandingkan penambahan waktu dari 5 liter ke 7 liter (4,5 menit) dan dari 7 liter ke 9 liter (11,5 menit).

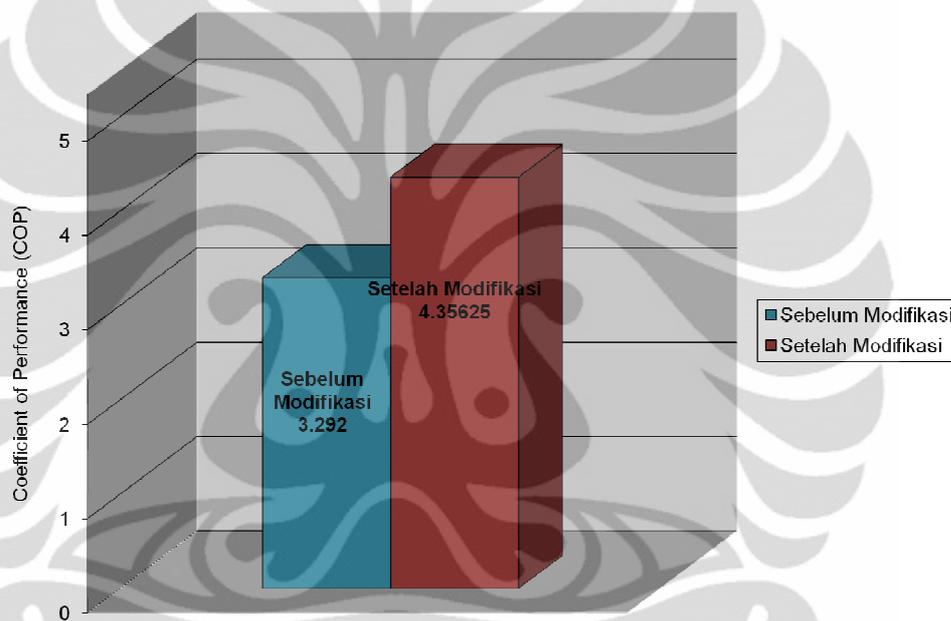
Pada saat jumlah bahan dasar sebanyak 5 liter, luas permukaan perpindahan kalor yang terjadi tidaklah termanfaatkan dengan baik, ada beberapa daerah di evaporator yang tak tersentuh oleh air laut, sehingga proses perpindahan panas tak optimal. Sementara pada jumlah 7 liter, luas permukaan perpindahan kalor menjadi lebih baik dan termanfaatkan dengan baik sehingga walaupun beban menjadi lebih banyak, namun waktu yang dibutuhkan tidak meningkat secara tajam. Pada jumlah 9 liter, luas permukaan perpindahan kalor memang lebih baik, namun luas perpindahan kalor tak mampu mengakomodasi jumlah bahan dasar sebanyak itu sehingga ada beberapa bagian air laut yang tak tersentuh bagian evaporator yang menyerap panas sehingga penambahan waktu yang dibutuhkannya menjadi meningkat tajam menjadi dua kali penambahan waktu dari 5 liter ke 7 liter. Pada jumlah 10 liter, lebih banyak lagi bagian air laut yang tak tersentuh bagian dingin evaporator sehingga proses perpindahan kalor menjadi buruk dan akibatnya waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan *ice slurry* menjadi sangat lama dengan penambahan waktu sekitar 14 menit. Melalui trend grafik ini dapat disimpulkan kapasitas terbaik untuk membuat *ice slurry* dengan menggunakan sistem ISG ini ialah dengan jumlah bahan dasar sebanyak 7 liter karena perpindahan kalor yang terjadi di evaporator termanfaatkan dengan baik.



Gambar 4. 12 Grafik waktu pembentukan ice slurry untuk jumlah bahan dasar yang berbeda.

IV. 2. 4 Analisis Perbandingan *Ice Slurry Generator* Sebelum dan Setelah Modifikasi

Ice slurry generator yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil modifikasi dari alat serupa yang diaplikasikan untuk dapat *menghasilkan ice slurry* untuk keperluan medis dan pendinginan gedung. Beberapa modifikasi telah dilakukan dan telah dijelaskan sebelumnya pada BAB III. Gambar 4.13 menunjukkan perbandingan performa *ice slurry generator* sebelum dan setelah dimodifikasi.

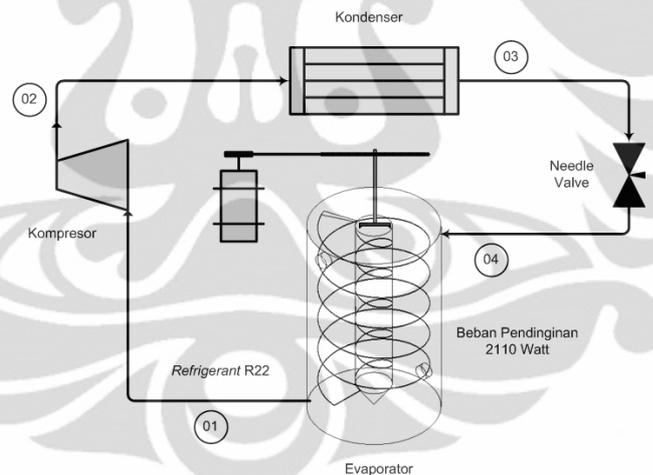


Gambar 4. 13 Perbandingan nilai COP siste refrigerasi *ice slurry generator* sebelum dan setelah dimodifikasi.

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa performa *ice slurry generator* setelah dimodifikasi mengalami kenaikan hingga 32%. Hal ini cukup beralasan karena pada instalasi sistem refrigerasi *ice slurry generator* yang baru, kompresor yang digunakan memiliki daya yang lebih besar, yaitu 1,5 HP dibandingkan sistem sebelumnya yang hanya menggunakan kompresor berdaya 1 HP. Selain itu, sistem pemipaan yang digunakan lebih sederhana yang dapat menurunkan nilai *pressure drop* dalam pipa, sehingga nilai entalphi dari *refrigerant* dapat lebih terjaga. Hal-hal yang telah disebutkan sebelumnya secara sistemik membuat performa sistem refrigerasi *ice slurry generator* yang baru menjadi lebih baik.

IV. 2. 5 Analisis Optimasi Sistem Refrigerasi

Setelah mengolah data di atas, penting rasanya untuk mengetahui kondisi optimum sistem refrigerasi agar dapat berkerja secara maksimal namun dengan kerja yang seminimal mungkin. Dalam sub bab ini, penulis mencoba untuk mencari parameter fisik *refrigerant*, yaitu temperatur kerja *refrigerant* di beberapa titik dalam sistem, agar mampu menghasilkan efek pendinginan maksimum dengan kerja kompresor yang minimum. Sistem refrigerasi *ice slurry generator* yang digunakan secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 4.14. Dalam sistem tersebut kita mengetahui rentang temperatur kondensasi, temperatur evaporasi, derajat *subcooling*, dan derajat *superheating* dari *refrigerant* melalui data pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Rentang nilai tersebut dapat menjadi *constraint* dengan fungsi objektif berupa persamaan kerja kompresor. Dengan menggunakan bantuan software MATLAB maka kita dapat mengetahui nilai optimum untuk setiap variabel yang ingin kita ketahui.



Gambar 4. 14 Sistem refrigerasi *ice slurry generator* secara sederhana.

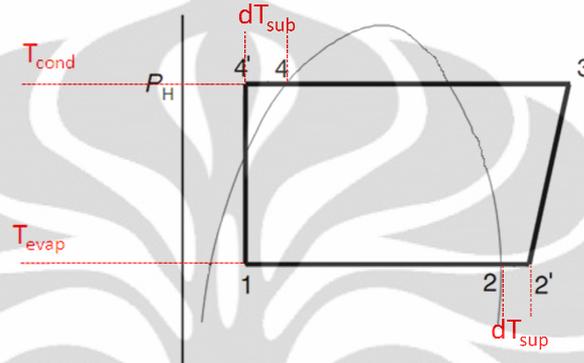
Fungsi objektif merupakan hasil substitusi persamaan (2.2) ke dalam persamaan (2.3), sehingga didapat fungsi objektif sebagai berikut:

$$f(x) = \frac{W_c \times (h_2 - h_1)}{(h_1 - h_4)} \quad (4.1)$$

Beberapa variabel yang ingin diketahui dan pembatasnya dapat dilihat pada Tabel 4.5 dengan ilustrasi variabel di sistem refrigerasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15. Setelah mengetahui fungsi objektif, variabel yang dicari, dan *constraint*, maka langkah selanjutnya ialah membuat m-file pada MATLAB yang berisi fungsi objektif dan variabel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 5 Beberapa variabel yang dicari dengan nilai pembatasnya.

Variabel yang dicari	Constraint
T_{cond} (temperatur kondensasi)	$27,74 \leq T_{\text{cond}} \leq 74,53$
T_{evap} (temperatur evaporasi)	$-24,44 \leq T_{\text{evap}} \leq 1,1$
ΔT_{sub} (derajat <i>subcooling</i>)	$1,6 \leq dT_{\text{sub}} \leq 3,03$
ΔT_{sup} (derajat <i>superheating</i>)	$13,34 \leq dT_{\text{sup}} \leq 25,91$

**Gambar 4. 15** Ilustrasi variabel pada sistem refrigerasi *ice slurry generator*.**Tabel 4. 6** Kode program berupa fungsi objektif dan variabel yang dicari dalam m-file.

optimasi_sistemISG.m
<pre> function f = optimasi_sistemISG(x) %Keterangan variabel dan constrains %x(1)=Tcond dengan constraint 27.74<=x(1)<=74.53 %x(2)=Tevap dengan constraint -24.44<=x(2)<=1.1 %x(3)=dTsub dengan constraint 1.6<=x(3)<=3.03 %x(4)=dTsup dengan constraint 13.34<=x(4)<=25.91 %Penulisan constraints gabungan untuk x(1) hingga x(4) dapat dituliskan: %lower=[27.74,-24.44,1.6,13.34] %upper=[74.53,1.1,3.03,25.91] %Siklus Dianggap ideal dengan efesiensi kompresor 100% %Beban pendinginan di evaporator diambil berdasarkan beban terbesar, yaitu 2110 Watt %Kalkulasi h1 Tevap=273.15+x(2);%K dTsup=x(4); Pevap=refpropm('P','T',Tevap,'Q',1,'R22');%kPa h1=refpropm('H','T',Tevap+dTsup,'P',Pevap,'R22');%J/kg </pre>

Lanjutan Tabel 4. 6

```

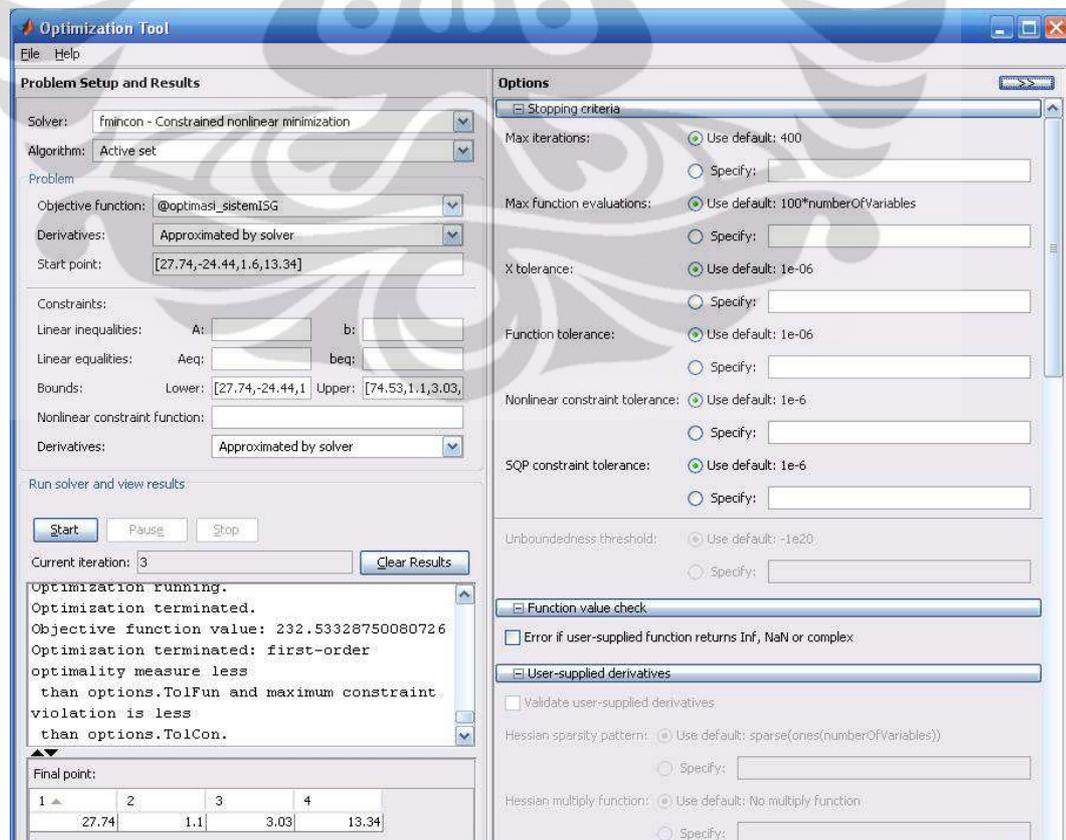
%Kalkulasi h2(h2,s)
S1=refpropm('S','T',Tevap+dTsup,'P',Pevap,'R22');%J/Kg K
Tcond=273.15+x(1);
Pcond=refpropm('P','T',Tcond,'Q',1,'R22');%kPa
h2=refpropm('H','P',Pcond,'S',S1,'R22');%J/kg

%Kalkulasi h4
dTsub=x(3);
h4=refpropm('H','T',Tcond-dTsub,'P',Pcond,'R22');%J/kg

%Fungsi objektif
f(1)=2110*(h2-h1)/(h1-h4);

```

Nantinya, m-file tersebut akan diolah menggunakan MATLAB dengan *Optimization Tool*. Dalam *Optimization Tool*, masukan m-file sebagai fungsi objektif dan konstraint-konstraint yang diketahui. Proses pengolahan dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.16.

Gambar 4. 16 Proses pengolahan dan hasil optimasi menggunakan *Optimization Tool*.

Optimization Tool menunjukkan bahwa untuk mendapatkan daya kompresor terendah namun dapat tetap memberikan efek refrigerasi sebesar 2110 Watt, *refrigerant* dalam sistem refrigerasi harus berkerja dengan temperatur kondensasi sebesar 27,74 °C, temperatur evaporasi sebesar 1,1 °C, derajat *subcooling* sebesar 3,03 °C, dan derajat *superheating* sebesar 13,34 °C. Dengan nilai-nilai tersebut kerja kompresor yang dibutuhkan hanya sebesar 232,53 Watt sehingga nilai COP-nya sebesar 9,07. Apabila dibandingkan dengan hasil pengolahan data yang didapatkan pada variasi data 10 liter malam yang memiliki efek refrigerasi 2110 Watt dengan kerja kompresor sebesar 440 Watt, maka hasil optimasi dapat menghemat daya kompresor hingga 207,47 Watt untuk efek pendinginan yang sama.

IV. 2. 6 Analisis Kesalahan

Selama melakukan penelitian ini, penulis menyadari banyaknya kesalahan yang telah dilakukan. Kesalahan pengukuran yang dilakukan dalam penelitian ini terbagi menjadi dua jenis, yaitu kesalahan sistematis dan kesalahan acak. Kesalahan acak ini muncul ketika adanya kekurangan dalam skema pengukuran yang terus terulang ketika pengukuran dilakukan. Beberapa yang menyebabkan kesalahan sistematis ini ialah kesalahan dalam kalibrasi instrumen, teknik pengukuran yang kurang benar, dan lain-lain. Termokopel yang digunakan dalam pengukuran temperatur sistem refrigerasi sebelumnya telah dilakukan kalibrasi (grafik hasil kalibrasi terlampir). Dengan menggunakan *Data Analysis* pada Microsoft Excel, dapat diketahui koefisien korelasi antara dua pengukuran (dalam kasus ini pengukuran menggunakan termokopel dan pengukuran menggunakan termometer air raksa). Korelasi hasil kalibrasi termokopel dengan termometer air raksa ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Korelasi hasil pengukuran termokopel dan termometer air raksa.

	Termo Air Raksa	Termokople 1	Termokople 2	Termokople 3	Termokople 4
Termo Air Raksa	1				
Termokople 1	0.998578299	1			
Termokople 2	0.999150552	0.998973598	1		
Termokople 3	0.999340354	0.99935984	0.999805537	1	
Termokople 4	0.999226294	0.999667744	0.999572299	0.999820738	1

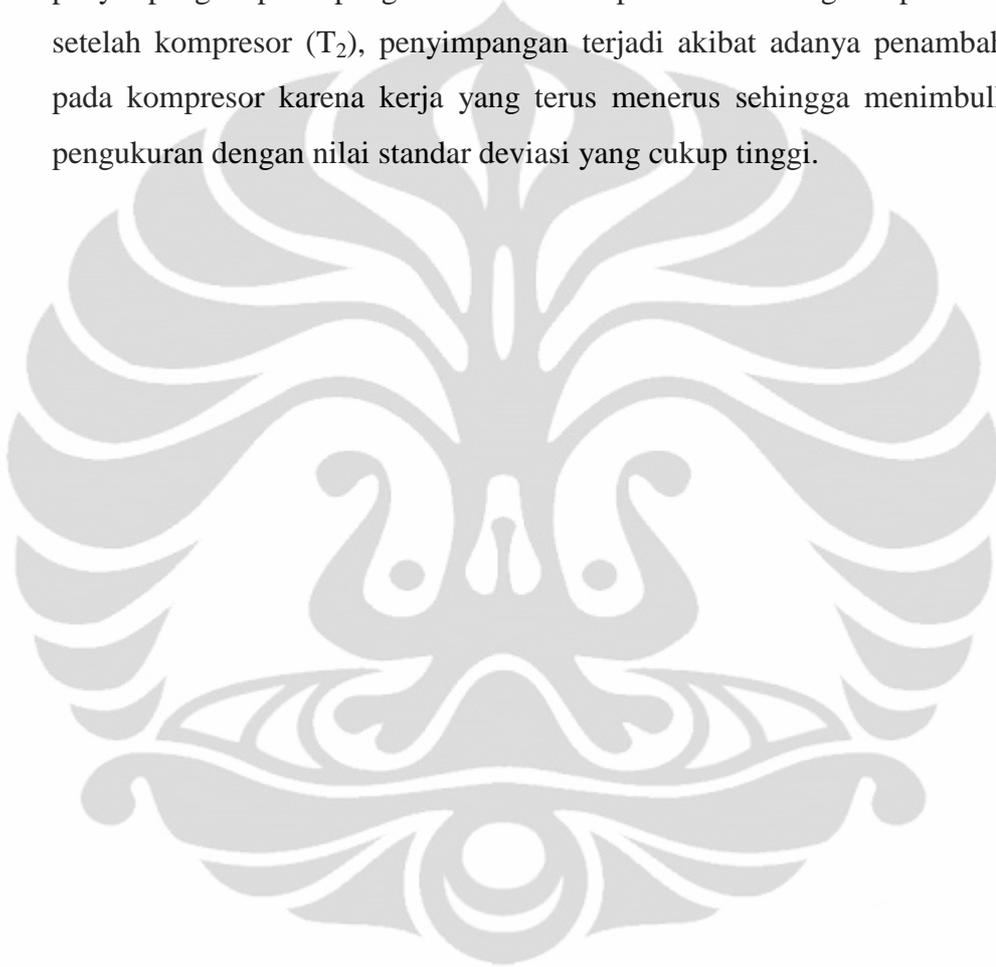
Tabel menunjukkan bahwa nilai reliabilitas untuk setiap pengukuran termokopel dengan termometer air raksa ialah di atas 0.99 dan hampir mendekati angka 1. Angka ini menunjukkan bahwa pengukuran yang ditunjukkan termokopel dengan termometer air raksa tidaklah jauh berbeda.

Kesalahan kedua yang mungkin muncul ialah kesalahan acak. Kesalahan acak muncul akibat adanya fluktuasi hasil pengukuran. Kesalahan perhitungan akibat tipe kesalahan ini dapat dikurangi dengan memperbanyak jumlah data yang diambil. Sama seperti sebelumnya dengan menggunakan *Data Analysis* pada Microsoft Excel, dapat diketahui analisa statistik dari hasil pengukuran. Tabel 4.8 menunjukkan analisa statistik dari hasil pengukuran untuk variasi data 10 liter malam hari.

Tabel 4. 8 Deskripsi statistik data pengukuran temperatur untuk variasi data 10 liter malam.

T1		T2	
Mean	1.099752718	Mean	71.76555381
Standard Error	0.165660077	Standard Error	0.156917105
Median	1.087151	Median	77.6834115
Mode	-11.861142	Mode	68.643101
Standard Deviation	13.34155136	Standard Deviation	12.63742991
Sample Variance	177.9969926	Sample Variance	159.7046348
Kurtosis	-0.547087941	Kurtosis	3.991880533
Skewness	0.110316074	Skewness	-2.138857938
Range	53.412661	Range	54.723133
Minimum	-24.980897	Minimum	27.72936
Maximum	28.431764	Maximum	82.452493
Sum	7132.996126	Sum	465471.382
Count	6486	Count	6486
T3		T4	
Mean	27.50002985	Mean	-23.37423992
Standard Error	0.013227792	Standard Error	0.126286823
Median	27.333035	Median	-25.4663365
Mode	25.519672	Mode	-25.618597
Standard Deviation	1.065309564	Standard Deviation	10.17059849
Sample Variance	1.134884468	Sample Variance	103.4410737
Kurtosis	2.180707616	Kurtosis	18.49849287
Skewness	1.141610491	Skewness	4.478369819
Range	6.49953	Range	56.117793
Minimum	25.433532	Minimum	-30.229714
Maximum	31.933062	Maximum	25.888079
Sum	178365.1936	Sum	-150775.1121
Count	6486	Count	6486

Tabel tersebut memperlihatkan beberapa deskripsi statistik penting untuk analisis kesalahan acak. Tabel menunjukkan bahwa nilai *standard error* dari setiap pengukuran termokopel masih di batas wajar. Nilai standar deviasi tertinggi dari terdapat pada pengukuran temperatur sebelum kompresor (T_1). Hal ini dapat disebabkan karena beban pendinginan yang terus berubah sehingga menyebabkan penyimpangan pada pengukuran ini cukup besar. Sedangkan pada temperatur setelah kompresor (T_2), penyimpangan terjadi akibat adanya penambahan kalor pada kompresor karena kerja yang terus menerus sehingga menimbulkan hasil pengukuran dengan nilai standar deviasi yang cukup tinggi.



BAB V

PENUTUP

V.1 KESIMPULAN

Setelah dilakukan serangkaian pengujian dan analisis maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

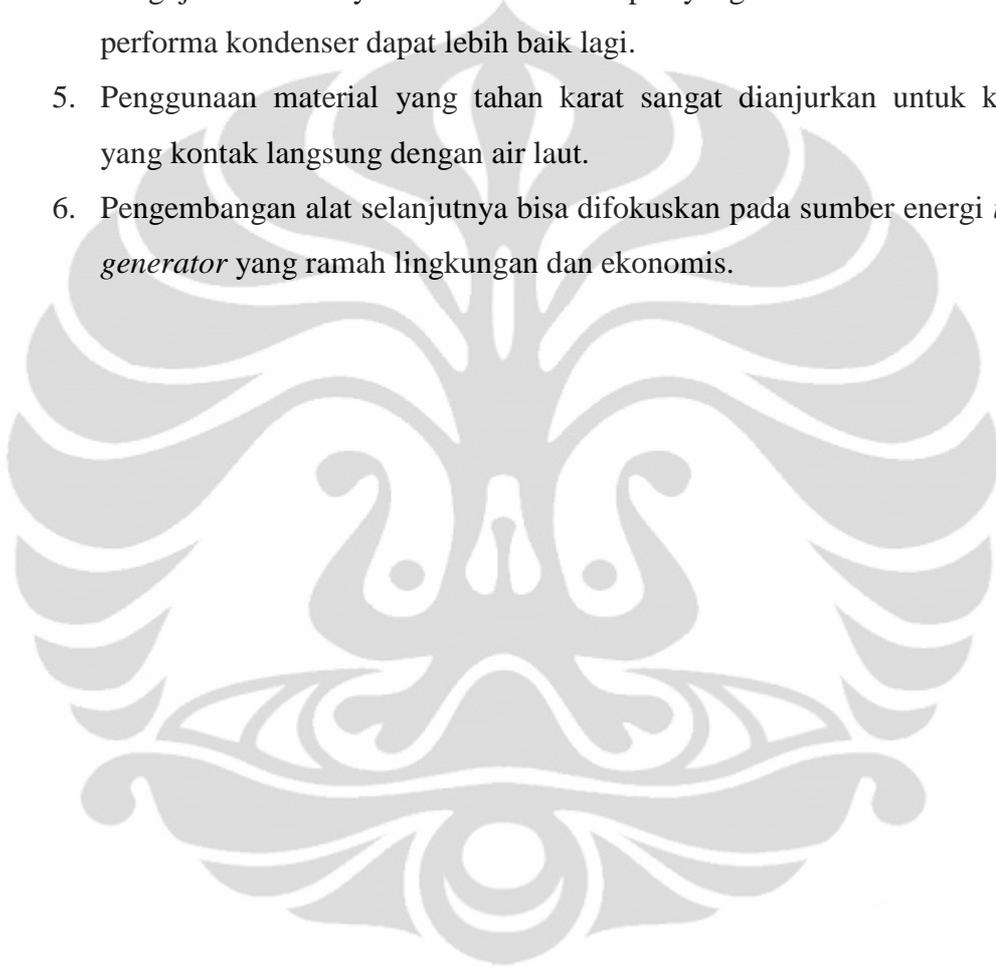
1. Nilai COP rata-rata untuk sistem refrigerasi *ice slurry generator* berbahan dasar air laut ialah sebesar 4,44 untuk pengerjaan malam hari (temperatur lingkungan rata-rata 26,325 °C) dan 4,27 untuk pengerjaan siang hari (temperatur lingkungan rata-rata 27,35 °C). Perbedaan ini dapat diakibatkan adanya perbedaan temperatur lingkungan antara malam hari dan siang hari dimana temperatur pada malam hari lebih rendah dibandingkan temperatur pada siang hari.
2. Pemetaan siklus *ice slurry generator* ke diagram p-h menunjukkan bahwa siklus berkerja secara optimal. Diagram p-h untuk pengerjaan malam hari memperlihatkan karakteristik yang lebih baik.
3. Waktu produksi *ice slurry* berbanding lurus dengan jumlah bahan dasar yang digunakan untuk membuat *ice slurry*. Semakin banyak jumlah bahan dasar semakin banyak waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan *ice slurry* dengan penambahan waktu yang bervariasi.
4. Apabila dilihat dari penambahan waktu produksi dan proses perpindahan kalor, maka kapasitas optimal berada pada angka 7 liter dengan lama waktu produksi 76,5 menit.

V.1 SARAN

Setelah melakukan proses modifikasi, pengujian, dan analisis terhadap alat, terdapat beberapa rekomendasi dan saran untuk pengembangan sistem *ice slurry generator*:

1. Penggunaan komponen sistem yang lebih berkualitas dapat meningkatkan kinerja pendinginan alat secara keseluruhan.

2. Penggunaan alat ukur yang lebih presisi seperti *pressure transmitter* dan *flowmeter* dapat mempermudah penelitian dan dapat mengeliminasi kesalahan-kesalahan yang dapat terjadi.
3. Alat ukur yang digunakan hendaknya diperbanyak agar dapat merepresentasikan sistem refrigerasi lebih baik lagi.
4. Pengujian hendaknya dilakukan di tempat yang memiliki udara sejuk agar performa kondenser dapat lebih baik lagi.
5. Penggunaan material yang tahan karat sangat dianjurkan untuk komponen yang kontak langsung dengan air laut.
6. Pengembangan alat selanjutnya bisa difokuskan pada sumber energi *ice slurry generator* yang ramah lingkungan dan ekonomis.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kelompok Kerja Data Statistik Kelautan dan Perikanan. Kelautan dan Perikanan Dalam Angka 2009. Jakarta: Pusat Data, Statistik, dan Informasi; 2009.
- [2] Masyamsir. Penanganan Hasil Perikanan. Bandung: Departemen Pendidikan Nasional; 2001.
- [3] Anonim^a, “*Mode Slurry Ice Systems*”. http://www.un.org/esa/sustdev/sids/2008_roundtable/presentation/fisheries_viglundsson.pdf. Download tanggal 19 Mei 2011.
- [4] Egolf P W, Kauffeld M. *From Physical Properties of Ice Slurries to Industrial Ice Slurry Application*. International Journal of Refrigeration 28 (2005) 4 – 12.
- [5] Nandy P, Nasruddin, Permana A, Jatmika A. Rancang Bangun dan Karakterisasi *Ice Slurry Generator*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) V. 2006.
- [6] Kauffeld M, Wang M J, Goldstein V, Kasza K E. *Ice Slurry Applications*. International Journal of Refrigeration 33 (2010) 1491 – 1505.
- [7] Nandy P, Imansyah, Noviandra H, Adiprana R. *Measurement of Heat Transfer Coefficient of Ice Slurry with Plate Heat Exchanger*. The 7th International Conference Quality in Research (QIR). 2004.
- [8] Stamatiou E, Meewisse J W, Kawaji M. *Ice Slurry Generation Involving Moving Parts*. International Journal of Refrigeration 28 (2005) 60 - 72.
- [9] Kauffeld M, Kawaji M, Egolf P W. *Handbook on Ice Slurries: Fundamentals and Engineering*. Paris: International Institute of Refrigeration; 2005.
- [10] Dincer I, Kanoglu M. *Refrigeration Systems and Applications*. Singapore: John Wiley & Sons, Ltd; 2010.

- [11] Miller R, Miller M R. *Air Conditioning and Refrigeration*. Singapore: McGraw-Hill Companies, Inc; 2006.
- [12] Brown E et al. *Seawater: Its Composition, Properties and Behaviour*. Singapore: Butterworth-Heinemann; 2004.
- [13] Millero F J, Poisson A. *International One-Atmosphere Equation of State of Seawater*. Oceanographic Research Papers 28 (1981) 625 – 629.
- [14] I Made Aryajatmika. Pengaruh Penambahan Adiktif Terhadap Karakteristik Ice Slurry yang Dihasilkan oleh *Ice Slurry Generator*. Skripsi. Depok: Program Sarjana Fakultas Teknik UI; 2006.
- [15] Kuswantoro. Rancang Bangun *Scraper* dan Analisis Pengaruh *Scraper* Terhadap Performa Ice Slurry Generator. Depok: Program Sarjana Fakultas Teknik UI; 2007.



MATLAB Program 1

```

clear all
clc

%Masukan Input Berdasarkan Data Yang Didapat
jenisFluid='R22';
T1=input('Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = ');
%Kelvin
P1=input('Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = '); %kPa
T2=input('Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = ');
%Kelvin
P2=input('Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = '); %kPa
T3=input('Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = ');
%Kelvin
P3=input('Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = '); %kPa
T4=input('Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = ');
%Kelvin
P4=input('Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = '); %kPa
Icomp=input('Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = ');
%Ampere
Vcomp=input('Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = '); % volt

%Menghitung nilai entalphi
h1=refpropm('H','T',T1,'P',P1,jenisFluid);%J/kg
h2=refpropm('H','T',T2,'P',P2,jenisFluid);%J/kg
h3=refpropm('H','T',T3,'P',P3,jenisFluid);%J/kg
h4=refpropm('H','T',T4,'P',P4,jenisFluid);%J/kg
h1NG=h1*(10^-3);%kJ/kg
h2NG=h2*(10^-3);%kJ/kg
h3NG=h3*(10^-3);%kJ/kg
h4NG=h4*(10^-3);%kJ/kg

%Menghitung Kerja Kompresor
cos_phi=0.98; % Nilai cos_phi di Lab Refrigerasi FTUI
Wc=Icomp*Vcomp*cos_phi; % Watt

%Menghitung Laju aliran massa refrigerant
m_dot=Wc/(h2NG-h1NG); % g/s

```

Lanjutan MATLAB Program 1

```

m_dot_NG=m_dot*(10^-3); % kg/s

%Menghitung Kalor yang diserap refrigerant
Qe=m_dot_NG*(h1NG-h4NG); %kW
Qe_NG=Qe*(10^3); %Watt

%Menghitung COP
COP=Qe_NG/Wc;

%Display yang dihasilkan
disp(' ');
disp('=====');
disp('Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =');
[h1NG h2NG h3NG h4NG]
fprintf('Nilai Kerja Kompresor = %.3g Watt\n',Wc);
fprintf('Nilai laju aliran massa refrigerant = %.3g
kg/s\n',m_dot_NG);
fprintf('Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = %.3g
Watt\n',Qe_NG);
fprintf('Nilai COP Untuk Sistem = %.3g \n',COP);
disp('=====');

```



LAMPIRAN B
HASIL Pengerjaan MATLAB

```

7/3/11 3:58 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 261.06
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 193.54
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 340.30
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1243.27
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 301.71
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1200.18
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 250.13
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 218.10
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.10
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 200.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    403.4720    445.0210    234.7848    234.7848

Nilai Kerja Kompresor = 412 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.00991 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.67e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.06
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 1 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 5 liter pengerjaan siang hari.

```

7/3/11 4:01 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 270.19
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 200.15
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 344.81
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1251.89
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 301.55
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1191.56
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 250.47
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 220.69
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.08
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 200.31

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    409.2934    448.6087    234.5818    234.5818

Nilai Kerja Kompresor = 408 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0104 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.81e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.44
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 2 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 7 liter pengerjaan siang hari.

```

7/3/11 4:05 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 269.48
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 203.98
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 345.84
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1215.98
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 301.07
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1187.25
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 250.59
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 222.37
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.21
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 200.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    408.7516    449.8903    233.9721    233.9721

Nilai Kerja Kompresor = 433 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0105 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.84e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.25
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 3 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 9 liter pengerjaan siang hari.

```

7/3/11 4:10 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 272.10
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 199.73
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 347.68
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1223.29
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 300.89
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1187.25
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 249.90
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 215.72
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.15
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 200.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    410.5550    451.2984    233.7437    233.7437

Nilai Kerja Kompresor = 421 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0103 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.83e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.34
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 4 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 10 liter pengerjaan siang hari.

```

7/3/11 3:52 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 267.31
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 188.99
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 341.42
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1214.34
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 300.65
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1177.40
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 248.71
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 205.73
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.01
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 210.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =

ans =

    407.6341    446.3100    233.4399    233.4399

Nilai Kerja Kompresor = 414 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0107 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.86e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.5
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 5 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 5 liter pengerjaan malam hari.

```

7/3/11 4:00 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 266.03
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 201.30
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 346.37
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1217.41
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 300.77
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1187.25
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 249.90
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 215.95
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.11
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 210.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =

ans =

    406.5462    450.3039    233.5915    233.5915

Nilai Kerja Kompresor = 434 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.00992 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.72e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 3.95
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 6 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 7 liter pengerjaan malam hari.

```

7/3/11 4:03 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 272.00
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 199.77
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 345.66
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1202.57
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 300.16
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1193.00
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 249.66
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 213.94
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.12
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 210.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    410.4885    449.9071    232.8188    232.8188

Nilai Kerja Kompresor = 436 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0111 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 1.97e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.51
=====
>>

```

LAMPIRAN B. 7 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 9 liter pengerjaan malam hari.

```

7/3/11 4:07 PM          MATLAB Command Window

Masukan Nilai Temperatur Masuk Kompresor (K) = 274.25
Masukan Nilai Tekanan Masuk Kompresor (kPa) = 203.43
Masukan Nilai Temperatur Keluar Kompresor (K) = 344.92
Masukan Nilai Tekanan Keluar Kompresor (kPa) = 1219.26
Masukan Nilai Temperatur Masuk Ekspansi (K) = 300.65
Masukan Nilai Tekanan Masuk Ekspansi (kPa) = 1184.79
Masukan Nilai Temperatur Keluar Ekspansi (K) = 249.78
Masukan Nilai Tekanan Keluar Ekspansi (kPa) = 214.92
Masukan Nilai Arus Yang Digunakan Kompresor (A) = 2.14
Masukan Nilai Tegangan Yang Digunakan Kompresor (v) = 210.00

=====
Nilai h1, h2, h3, dan h4 (kJ/kg) dari kiri ke kanan =
ans =

    411.8983    449.1014    233.4395    233.4395

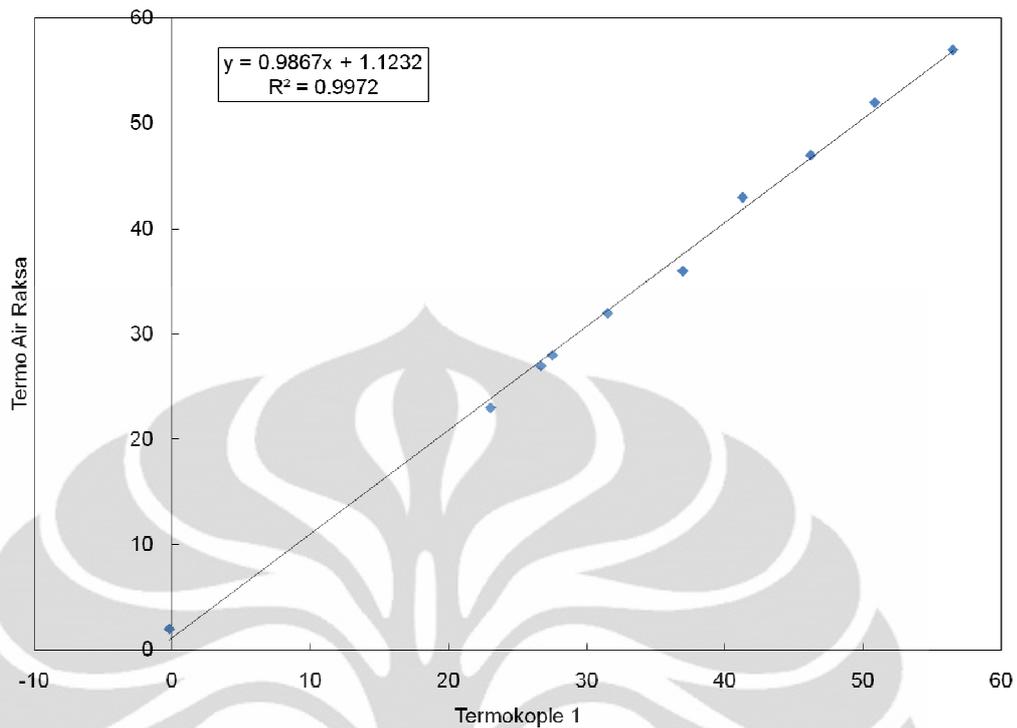
Nilai Kerja Kompresor = 440 Watt
Nilai laju aliran massa refrigerant = 0.0118 kg/s
Nilai Efek Pendinginan pada Tangki Generator = 2.11e+003 Watt
Nilai COP Untuk Sistem = 4.8
=====
>>

```

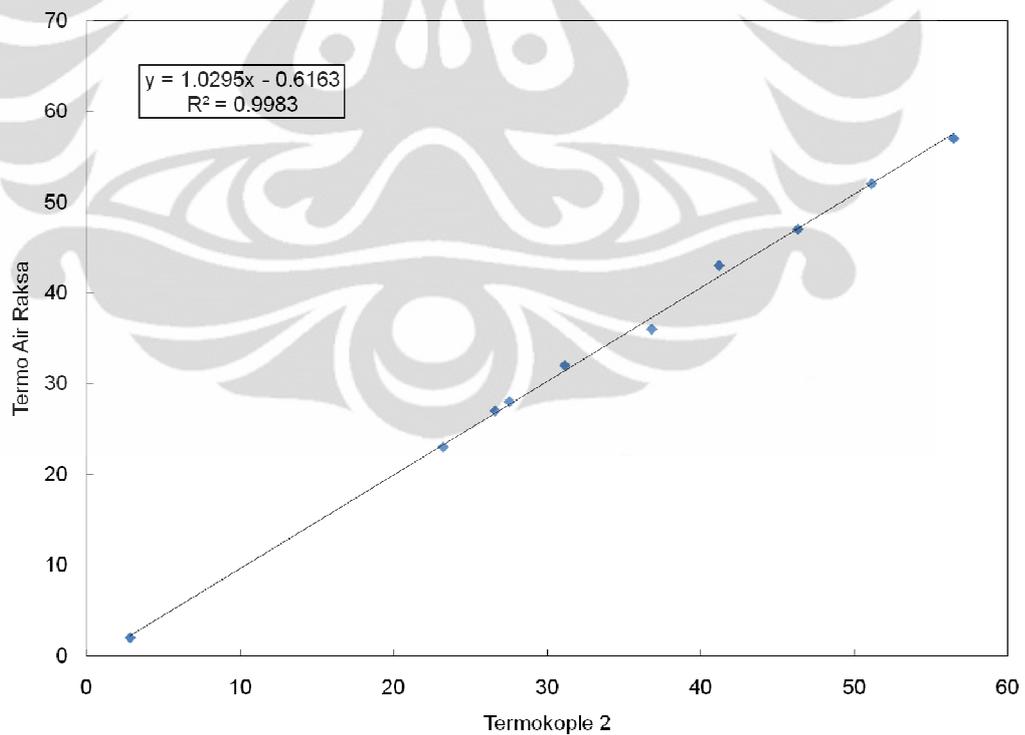
LAMPIRAN B. 8 Hasil Pengerjaan MATLAB untuk variasi data 10 liter pengerjaan malam hari.



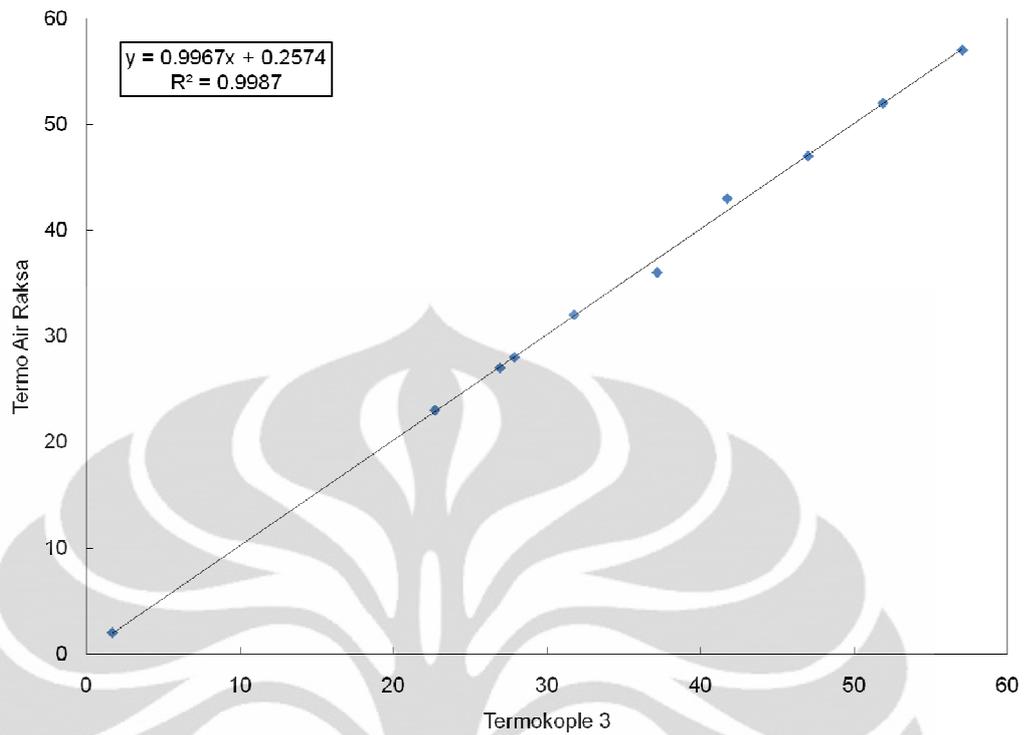
LAMPIRAN C
GRAFIK KALIBRASI TERMOKOPEL



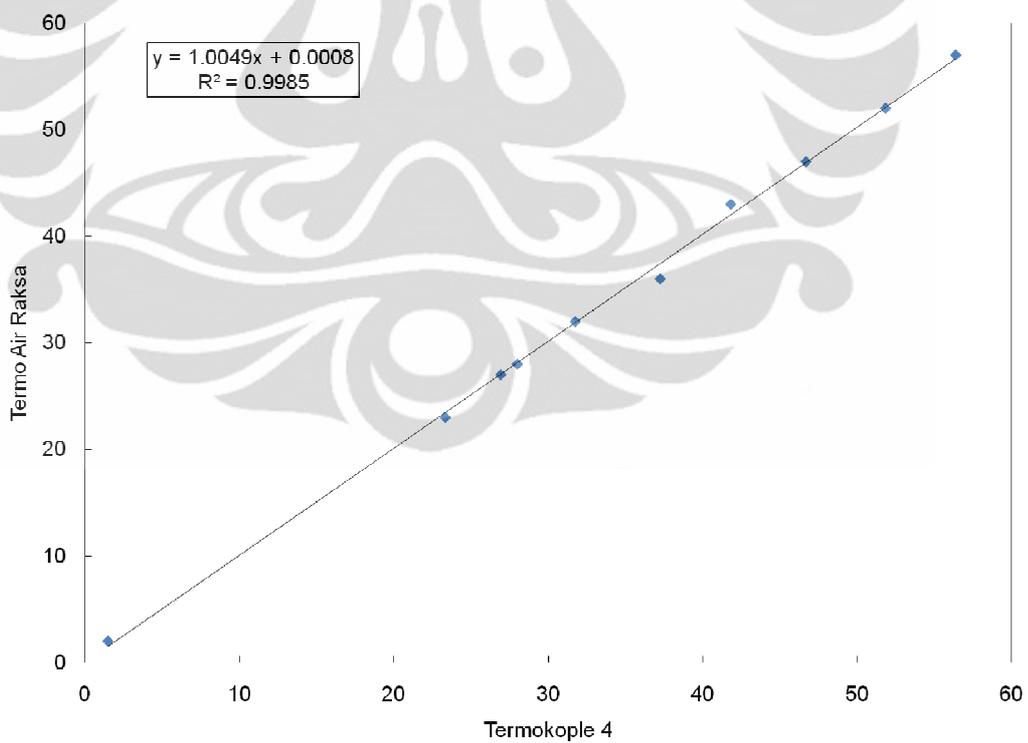
LAMPIRAN C. 1 Grafik hasil kalibrasi termokopel 1 (sebelum kompresor)



LAMPIRAN C. 2 Grafik hasil kalibrasi termokopel 2 (setelah kompresor).



LAMPIRAN C. 3 Grafik hasil kalibrasi termokopel 3 (setelah kondenser).



LAMPIRAN C. 4 Grafik hasil kalibrasi termokopel 4 (setelah alat ekspansi).