

**PENGARUH PENAMBAHAN *SUBCOOLING* TERHADAP UNJUK
KERJA MESIN PENDINGIN DENGAN REFRIGERAN *MUSICOOL*
(MC-22)**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :
DADANG EDY KURNIAWAN
NIM. 0810620048-62

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2013**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH PENAMBAHAN *SUBCOOLING* TERHADAP UNJUK KERJA MESIN
PENDINGIN DENGAN REFRIGERAN *MUSICOOL* (MC-22)**

**Skripsi
Konsentrasi Konversi Energi**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
DADANG EDY KURNIAWAN
NIM. 0810620048-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing

Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT
NIP. 19740930 200012 1 001



repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH PENAMBAHAN *SUBCOOLING* TERHADAP UNJUK KERJA MESIN
PENDINGIN DENGAN REFRIGERAN *MUSICOOL* (MC-22)

SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :
DADANG EDY KURNIAWAN
NIM. 0810620048

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan **lulus** pada
tanggal 23 Januari 2013

DOSEN PENGUJI

Skripsi I

Skripsi II

Sugiarto, ST.,MT
NIP. 19690417 199512 1 001

Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc.
NIP. 19490911 198403 1 001

Komprehensif

Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST.,M.Eng
NIP. 19740121 199903 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST.,MT
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wr.wb. Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan nikmat, rahmat, hidayah dan karunia yang telah diberikan, juga sholawat dan salam penulis tujukan kepada Nabi Besar Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "**Pengaruh Penambahan *Subcooling* Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pendingin dengan Refrigeran *Musicool* (MC-22)**"

Penyusunan dan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Ibu Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT., selaku Ketua Kelompok Dosen Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., CSE., selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan selama masa kuliah.
5. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., yang telah banyak memberikan masukan, pengetahuan dan telah banyak meluangkan waktu untuk berdiskusi dengan penulis selama penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh Dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin, seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin serta Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
7. Bapak Marsudi dan ibu Khumayaroh sebagai dua orang yang menjadi orang tua terbaik di dunia yang telah memberikan segala-galanya kepada saya baik berupa moril maupun materiil serta memberikan semangat yang seakan tidak pernah ada habisnya.
8. Kakak saya Wahyu Timor Irawan, ST., terima kasih atas motivasi dan dukungannya, akhirnya adikmu ini juga bisa sepertimu.
9. Vica Alfiatus Soffa, S.Pt., yang selalu menemani, memberikan kasih sayang dan motivasi selama penulis menempuh kuliah hingga sampai menyelesaikan skripsi ini.

10. Tante Sumarlik dan om Samsuri terima kasih telah menjadi orang tua kedua selama saya di malang. Adek Rifka dan Hafid semoga kelak kalian bisa melebihi kakak mu ini, amin.
11. Teman – teman asisten Laboratorium Pengecoran Logam : Dimas “cipeng”, Bagas “debug”, May vendra “lembotho”, Harun “baswoyo”, Binar, Dimas “chang”, Arief “jimboz”, Hilmi, Herdi, Peter “peno”. Terima kasih atas diskusi - diskusi ilmu yang menjadikan saya mengerti teknik pengecoran logam.
12. Teman – teman seperjuangan Mesin 2008 “EMPEROR”, Andy “temon”, Angga “soed”, Suci “kahim”, Osye “bingung”, Iqbal “gombal”, Clief, Andika “tukul”, Aris “siwe”, Andi “bondet”, Tegar “suteg”, Syaiful, Yudo “kebo”, Andika “kutang”, dll. Terima kasih atas kekompakan dan seluruh bantuannya dalam menyelesaikan masalah-masalah yang saya hadapi baik di perkuliahan, praktikum, dan hal-hal lain selama empat tahun terakhir ini yang tak mungkin bisa saya lupakan.
13. Erika Firdauzy Aminia, terima kasih selama atas yang kamu berikan selama ini, semoga kita akan bertemu lagi di lain waktu.
14. Satu regu penelitian pendingin, Jaka “kojek”, Azhari, akhirnya kita bisa juga bray.
15. Seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung dengan saya, sehingga saya mampu menyelesaikan skripsi ini, terima kasih atas segala bentuk bantuannya yang telah diberikan kepada saya.

Penulis menyadari bahwa ilmu yang dimiliki masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan skripsi ini, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. amin...

Wassalamualaikum wr.wb

Malang, Januari 2013

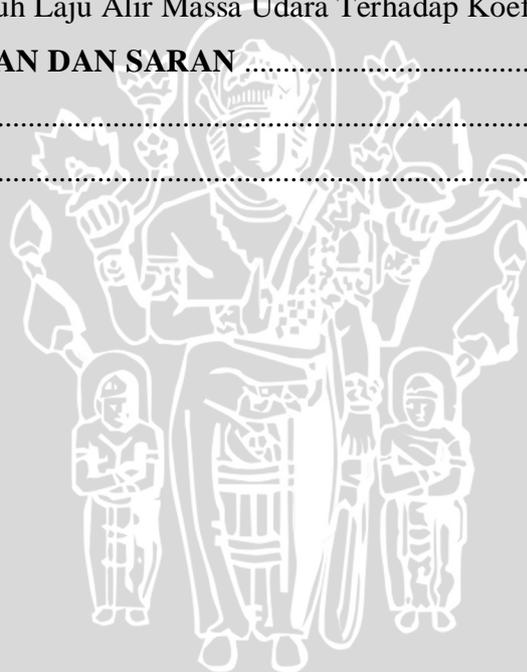
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian - penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Sistem Refrigerasi dan Pengondisi Udara	6
2.3 Sifat Termodinamika.....	7
2.4 Psikrometri	8
2.5 Persamaan Energi Aliran Mantap	10
2.6 Mesin Pendingin	11
2.6.1 Macam – macam Mesin Pendingin.....	11
2.6.2 Bagian – bagian Mesin Pendingin.....	17
2.6.3 Dasar – dasar Perhitungan Unjuk Kerja Mesin Pendingin	23
2.7 Refrigeran.....	24
2.7.1 Macam – macam Refrigeran.....	24
2.7.2 Syarat – syarat Refrigeran.....	27
2.7.3 Refrigeran Musicool (MC-22).....	27
2.8 <i>Subcooling</i>	29
2.8.1 Siklus Mesin Pendingin dengan <i>Subcooling</i>	30
2.9 Hipotesa.....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	32
3.1 Metodologi Penelitian	32
3.2 Variabel Penelitian.....	32



3.3 Alat – alat yang digunakan.....	33
3.4 Instalasi Penelitian.....	39
3.5 Prosedur Penelitian.....	41
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Analisis Data.....	43
4.1.1 Data Hasil Penelitian.....	43
4.2 Perhitungan Data.....	44
4.3 Data Hasil Perhitungan.....	48
4.4 Pembahasan.....	49
4.4.1 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Efek Refrigerasi.....	49
4.4.2 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Kerja Kompresi.....	51
4.4.3 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Koefisien Prestasi.....	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Beberapa senyawa halokarbon	25
Tabel 2.2	Beberapa senyawa hidrokarbon	25
Tabel 2.1	Beberapa senyawa anorganik	26
Tabel 3.1	Karakteristik refrigeran MC-22	34
Tabel 4.1	Data hasil pengujian	43



DAFTAR GAMBAR

	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Daur refrigerasi carnot	6
Gambar 2.2	Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap	10
Gambar 2.3	Daur siklus absorpsi	13
Gambar 2.4	Daur siklus kompresi uap	15
Gambar 2.5	Diagram tekanan–entalpi siklus kompresi uap	15
Gambar 2.6	Kompresor rotari	18
Gambar 2.7	Kondensor	19
Gambar 2.8	Alat ekspansi	21
Gambar 2.9	Evaporator	21
Gambar 2.10	Titik beku larutan – larutan glikol etilen	26
Gambar 2.11	Diagram tekanan – entalpi <i>subcooling</i>	30
Gambar 3.1	Instalasi AC <i>Bench PA Hilton</i>	33
Gambar 3.2	Termometer bola kering	34
Gambar 3.3	Termometer bola basah	35
Gambar 3.4	Tachometer	35
Gambar 3.5	Mesin Vacuum Refrigeran	36
Gambar 3.6	<i>subcooler</i>	36
Gambar 3.7	<i>Manifold</i>	37
Gambar 3.8	Pompa	37
Gambar 3.9	<i>Digital Thermometer</i>	38
Gambar 3.10	Instalasi penelitian	39
Gambar 4.1	Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Efek Refrigerasi	49
Gambar 4.2	Grafik Perbandingan Siklus Standart Dan Siklus Dengan <i>Subcooling</i>	50
Gambar 4.3	Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Kerja Kompresi	51
Gambar 4.4	Grafik perbandingan kerja kompresi	52
Gambar 4.5	Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap	53

Koefisien Prestasi

Gambar 4.6

Grafik Perbandingan Siklus Standart Dan Siklus Dengan

54

Subcooling



DAFTAR LAMPIRAN

Judul

- | | |
|------------|---|
| Lampiran 1 | Data hasil perhitungan |
| Lampiran 2 | Diagram psikrometri |
| Lampiran 3 | Diagram p-h R-290 |
| Lampiran 4 | Tabel saturasi R-290 |
| Lampiran 5 | Tabel property MC-22 |
| Lampiran 6 | Perhitungan laju alir massa udara yang melewati <i>duct</i> |
| Lampiran 7 | Rumus $T_{\text{subcooler}}$ |



RINGKASAN

Dadang Edy Kurniawan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2013, Pengaruh Penambahan *Subcooling* Terhadap Unjuk Kerja Mesin Pendingin dengan Refrigeran *Musicool* (MC-22), Dosen Pembimbing : Mega Nur Sasongko.

Penggunaan mesin pendingin bertujuan untuk mengondisikan dan menyegarkan udara ruangan. Pada siklus mesin pendingin dibutuhkan refrigeran, saat ini masih banyak yang menggunakan refrigeran yang mengandung *chlorine* sehingga memiliki ODP (*Ozone Depleting Substance*) yang dapat merusak ozon. Di samping itu GWP (*Global Warming Potential*) atau efek pemanasan global akibat emisi secara langsung maupun tidak langsung dari gas rumah kaca (termasuk CFC) juga menjadi masalah lingkungan. Sehingga saat ini dicari refrigeran alternatif pengganti CFC yang ramah lingkungan seperti refrigeran hidrokarbon. Hidrokarbon dapat digunakan sebagai refrigeran alternatif karena mempunyai nilai GWP yang kecil dan nilai ODP yang nol. Pada penggunaan mesin pendingin diperlukan performa yang optimal, untuk mendapatkan performa yang optimal dilakukan modifikasi siklus seperti *subcooling*. *Subcooling* adalah proses penurunan suhu refrigeran setelah melalui titik *saturated liquid* dan wujud refrigeran disebut *subcooled liquid*, kondisi dimana refrigeran cair lebih dingin dari suhu minimum ini diperlukan untuk menjaga dari mendidihnya refrigeran oleh karena perubahan dari cair ke fase gas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan *subcooling* setelah kondensor menggunakan refrigeran *musicool* terhadap unjuk kerja instalasi AC. Pengujian ini dilakukan dengan mengatur laju alir massa udara 0.0654; 0.075; 0.085; 0.094; 0.103 [kg/s] dan tingkat *subcooling* 6; 7; 8 [°C] serta beban *heater* dan *boiler* sebesar 2 (kW).

Analisa dari hasil pengujian didapatkan bahwa semakin besar tingkat *subcooling* menyebabkan temperatur refrigeran masuk evaporator semakin kecil, mengakibatkan nilai dari Δh akan semakin besar sehingga meningkatkan nilai unjuk kerja dari instalasi AC sedangkan pada penggunaan refrigeran hidrokarbon menunjukkan penggunaan yang lebih irit dan meningkatkan unjuk kerja AC dari pada refrigeran halokarbon.

Kata kunci : mesin pendingin, refrigeran MC-22, *subcooling* dan unjuk kerja.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era modern saat ini perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi sangat pesat, tidak hanya terpusat pada satu bidang saja melainkan hampir semua bidang mengalami perkembangan yang cukup pesat. Salah satunya adalah semakin berkembangnya sistem refrigerasi, penerapan dari sistem refrigerasi atau mesin pendingin sendiri dapat kita lihat pada perumahan, perkantoran maupun pada kendaraan bermotor bahkan pada instansi pendidikan pun banyak yang telah menggunakan mesin pendingin, secara umum penggunaan mesin pendingin bertujuan untuk mengondisikan dan menyegarkan udara ruangan.

Mesin pendingin merupakan mesin konversi energi yang digunakan untuk memindahkan kalor dari temperatur rendah ke temperatur yang lebih tinggi dengan bantuan kerja dari luar. Lebih jelasnya, mesin pendingin merupakan peralatan yang digunakan dalam proses pendinginan suatu fluida sehingga mencapai temperatur dan kelembaban yang diinginkan, dengan jalan menyerap panas dari suatu reservoir dingin dan diberikan ke reservoir panas. Komponen utama mesin pendingin terdiri dari empat bagian yaitu evaporator, kompresor, kondensor, dan alat ekspansi (Arismunandar dan Saito, 1980 : 1).

Komponen lain yang paling penting pada mesin pendingin adalah refrigeran. Refrigeran merupakan fluida kerja yang bersikulasi dalam siklus refrigerasi. Refrigeran menyerap kalor pada temperatur dan tekanan rendah selama evaporasi dan melepaskan kalor pada temperatur dan tekanan tinggi selama proses kondensasi. Perkembangan mutakhir dibidang refrigeran berdasarkan *Montreal Protocol* dan *Kyoto Protocol* yang paling utama adalah didorong oleh dua masalah lingkungan, yaitu ODS (*Ozone Depleting Substance*) dan GWP (*Global Warming Potential*). *Montreal Protocol* sendiri lebih menyoroti pada permasalahan kerusakan ozon yang disebabkan oleh bahan refrigerasi yang mengandung *chlorine* yang dapat mengakibatkan radiasi sinar UV sehingga dapat menyebabkan kulit terbakar bahkan kanker kulit, sedangkan *Kyoto Protocol* masalah yang disoroti tentang pemanasan

global yang berasal dari gas efek rumah kaca yang dapat mengakibatkan mencairnya es di kutub sehingga luas perairan akan bertambah dan cuaca ekstrim lainnya.

Pada saat ini CFC digunakan secara luas sebagai refrigeran, karena pada awalnya CFC dianggap mempunyai banyak keuntungan antara lain properti fisika dan termal yang baik sebagai refrigeran, stabil, tidak mudah terbakar, tidak beracun dan kompatibel terhadap sebagian besar bahan komponen dalam sistem refrigerasi. Tetapi di sisi lain aspek lingkungan yang kronis tidak dipertimbangkan di awal-awal penggunaannya, karena ternyata CFC termasuk *Ozone Depleting Substance* (ODS), yaitu zat yang dapat menyebabkan kerusakan ozon dengan dilepaskannya atom *chlorin* ke atmosfer. Di samping itu efek pemanasan global akibat emisi secara langsung maupun tidak langsung dari gas rumah kaca (termasuk CFC) juga menjadi masalah lingkungan. Sehingga pada konferensi Vienna yang merupakan kelanjutan dari *Montreal Protocol* menghasilkan tentang penghentian pemakaian refrigeran CFC dan HCFC serta mencari refrigeran alternatif yang ramah lingkungan seperti refrigeran hidrokarbon.

Hidrokarbon sendiri sebagai salah satu refrigeran alternatif memiliki banyak keuntungan antara lain tidak diperlukan perubahan peralatan utama yang sudah ada atau pembelian peralatan baru, hidrokarbon biasa dipakai dengan pelumas mineral maupun sintetis serta tidak menyebabkan kerusakan ozon dan pemanasan global karena ODP yang dimiliki nol dan GWP nya kecil. Kebutuhan pengisian hidrokarbon dalam mesin pendingin kurang dari separuh ($\pm 30\%$) dibandingkan CFC. Penggunaan energi pengoperasian alat pendingin lebih hemat, karena tekanan kondensasi menurun sehingga rasio kompresi berkurang dan kerja kompresor yang lebih ringan serta cepat mencapai suhu yang diinginkan. Meskipun demikian hidrokarbon masih memiliki kelemahan, yaitu mudah terbakar.

Salah satu mesin pendingin yang digunakan secara luas dimasyarakat adalah *air conditioner* (AC). Para pengguna AC tentu menginginkan kondisi ruangan yang dingin, sejuk serta nyaman ketika mereka berada didalamnya. Oleh karena itu diperlukan AC yang mampu memberikan performa yang optimal. Performa suatu *air conditioner* dapat kita ketahui dari kapasitas pendinginan dan koefisien prestasinya.

Dalam usaha untuk memperoleh performa AC yang optimal tersebut dapat dilakukan dengan beberapa modifikasi pada AC, diantaranya dengan modifikasi siklus seperti *subcooling*. *Subcooling* adalah proses penurunan suhu refrigeran setelah

melalui titik *saturated liquid* dan wujud refrigeran disebut *subcooled liquid*, kondisi dimana refrigeran cair lebih dingin dari suhu minimum ini diperlukan untuk menjaga dari mendidihnya refrigeran oleh karena perubahan dari cair ke fase gas. Besarnya pendinginan lanjut yang terjadi di kondenser ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur kondensasi dengan temperatur yang terukur di akhir kondensor.

Para pengguna AC tentu saja menginginkan kondisi ruangan yang dingin, sejuk serta nyaman ketika mereka berada di dalamnya. Untuk itu diperlukan AC yang mampu memberikan performa yang optimal. Pada penelitian ini digunakan instalasi berupa *AC Bench P.A Hilton*. Instalasi ini merupakan jenis dari mesin pendingin kompresi uap, jadi hasil dari penelitian ini berlaku juga untuk unjuk kerja dari *Cold Storage, Freezer, AC rnobil* dan lain-lain. Performa suatu AC bisa kita lihat dari unjuk kerjanya.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimanakah pengaruh penambahan *subcooling* terhadap unjuk kerja mesin pendingin dengan refrigeran musicool (MC-22)

1.3 Batasan Masalah

Agar lebih spesifik, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut :

1. Refrigeran yang digunakan adalah MC-22
2. Instalasi yang dipakai adalah *AC Bench P.A Hilton*
3. Ruang sekat pada kondisi *steady state* (tidak berubah terhadap waktu)
4. Udara lingkungan sekitar diasumsikan memiliki kelembaban dan temperatur konstan
5. Temperatur udara lingkungan dianggap 30 °C
6. Daya pompa pada instalasi *subcooling* diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan *subcooling* terhadap unjuk kerja mesin pendingin dengan refrigeran musicool (MC-22)

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut :

1. Memberikan masukan bagi masyarakat dalam usaha meningkatkan unjuk kerja mesin pendingin.
2. Memberi informasi tentang kondisi Performa mesin pendingin menggunakan refrigeran MC-22 dengan penambahan *subcooling* yang dimiliki Laboratorium Mesin Pendingin Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Sebagai referensi tambahan bagi mahasiswa teknik mesin pada khususnya dalam penelitian - penelitian selanjutnya tentang mesin pendingin.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian – Penelitian Sebelumnya

Effendy (2005), melakukan penelitian tentang “Pengaruh Kecepatan Udara Pendingin Kondensor Terhadap Koefisien Prestasi *Air Conditioning*”. Pada bagian kondensor dipasang kipas angin yang bisa diatur putarannya, penambahan perangkat tersebut dimaksudkan untuk meningkatkan laju aliran udara sehingga mempercepat proses pelepasan kalor ke lingkungan. Kecepatan udara pendingin kondensor diatur dengan menambahkan putaran motor listrik penggerak kipas, variasi kecepatan udara pendingin antara 0.2 – 2.98 m/s yang dihasilkan dari putaran kipas 60 – 309 rpm. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar laju aliran udara untuk mendinginkan kondensor maka besarnya koefisien prestasi semakin meningkat.

Basri (2009), melakukan penelitian tentang “Pengaruh Temperatur Kondensor Terhadap Kinerja Mesin Refrigerasi Focus 808”. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pengaruh perubahan tekanan pada kondensor dan mendapatkan kondisi kerja yang optimal dalam pengoperasian mesin dengan mensimulasikan temperatur kondensor. Tekanan kondensor diubah dari 8 sampai 11 bar dengan mempertahankan tekanan evaporator pada tekanan tertentu. Hasil penelitian menunjukkan kenaikan temperatur kondensor akan menyebabkan kenaikan daya kompresor, tetapi menurunkan kapasitas refrigerasi sehingga menurunkan koefisien prestasi sistem refrigerasi. Kerja yang optimal yang cocok digunakan pada mesin refrigerasi focus 808 di laboratorium yaitu pada temperatur 31°C dengan koefisien prestasi 4,54.

Syaiful (2005), melakukan penelitian tentang “Unjuk Kerja Sistem Air-Cooled Chiller Dengan Evaporator Jenis Spiral Menggunakan Refrigeran HCR-22”. Hasil dari menggunakan refrigeran hidrokarbon tipe 22 (HCR 22) ini adalah COP yang mempunyai kecenderungan naik oleh karena kenaikan temperatur keluar evaporator (T_1). Dimana pada temperatur keluar evaporator (T_1) -5°C dan 10°C, COP-nya masing – masing adalah sebesar 3,22 dan 3,98. Maka kenaikan COP dari temperatur keluar evaporator (T_1) -5°C menjadi 10°C adalah sebesar 23,6 %. Data tersebut diambil pada nilai temperatur kondensor 29°C.

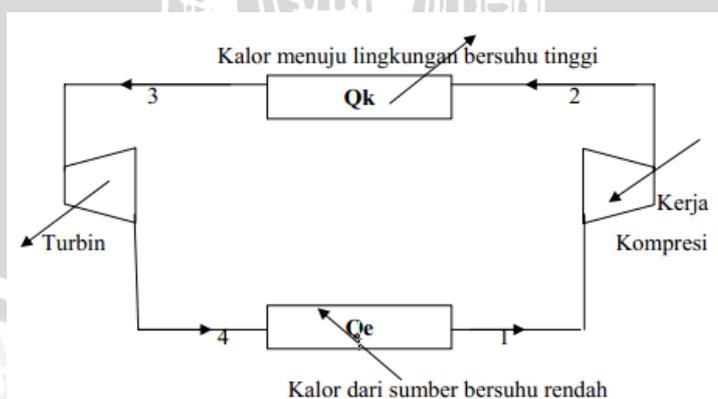
Nasruddin (2006), melakukan penelitian tentang “Penelitian Perbandingan Unjuk Kerja Tiga Refrigeran Hidrokarbon Indonesia Terhadap Refrigeran R12 (CFC-

12)”. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan beberapa jenis hidrokarbon produksi Indonesia. Pengujian dilakukan dengan kondisi operasi putaran kompresor 2980 rpm, temperatur masuk divariasikan antara -2°C sampai dengan 6°C dan temperatur keluar kondensor ditetapkan sebesar 39°C . Analisa dari hasil pengujian didapatkan bahwa unjuk kerja refrigeran hidrokarbon adalah hampir sama dengan CFC-12 bahkan pada beberapa parameter pengujian menunjukkan unjuk kerja yang lebih baik, sehingga dapat disimpulkan bahwa hidrokarbon sangat cocok digunakan sebagai refrigeran alternatif pengganti CFC-12.

2.2 Sistem Refrigerasi dan Pengondisi Udara

Refrigerasi dan pengondisian udara merupakan suatu proses yang saling berkaitan satu sama lain, akan tetapi masing – masing mempunyai ruang lingkup yang berbeda – beda. Refrigerasi merupakan proses penurunan temperatur dan menjaga agar temperatur ruang atau bahan yang ada di ruangan tetap berada dibawah temperatur sekelilingnya. Pada sistem refrigerasi ini terjadi pemindahan kalor secara terus menerus dari ruangan ke lingkungan. Sedangkan media yang digunakan untuk memindahkan kalor adalah refrigeran, yang bersirkulasi secara tertutup dalam sistem refrigerasi tersebut.

Siklus refrigerasi Carnot merupakan kebalikan dari siklus mesin Carnot atau siklus Carnot, dimana pada siklus ini terjadi penyerapan kalor dari reservoir suhu rendah dan pelepasan kalor pada reservoir suhu tinggi (Stoecker, 1992). Daur refrigerasi carnot bisa kita lihat pada gambar 2.1 berikut ini :



Gambar 2.1 Daur refrigerasi carnot
Sumber : Cengel (1998:618)

Teknik pengondisian udara tidak hanya mendinginkan udara, tetapi penekanannya pada kenyamanan pengguna atau pemakai (*Comfort Air Conditioning*).

Menurut definisi pengkondisian udara adalah proses perlakuan terhadap udara untuk mengatur suhu, kelembaban, kebersihan, dan pendistribusiannya secara serentak guna mencapai kondisi nyaman yang dibutuhkan oleh penghuni yang berada di dalamnya. Pengkondisian udara juga mencakup usaha pemanasan atau penghangatan ruangan, seperti pengaturan kecepatan, radiasi termal, dan kualitas udara termasuk penyisihan partikel dan uap pengotor (Stoecker, 1992).

2.3 Sifat Termodinamika

Bagian penting dalam menganalisis sistem termal adalah penentuan sifat termodinamika yang bersangkutan. Suatu sifat adalah setiap karakteristik atau ciri dari bahan yang dapat dijabari secara kualitatif, seperti suhu, tekanan, dan rapat massa. Keadaan atau kondisi termodinamika suatu sistem didefinisikan berdasarkan sifat – sifatnya (Stoecker, 1992:14). Dalam penelitian ini sifat – sifat termodinamika yang paling diutamakan adalah :

1. Temperatur

Temperatur adalah istilah yang penting dan didefinisikan sebagai derajat panas atau tingkat intensitas panas suatu benda. Benda yang panas disebut mempunyai temperatur yang lebih tinggi, sedangkan benda dingin mempunyai temperatur yang lebih rendah. Ukuran suhu dinyatakan dengan angka dan angka ini disebut derajat seperti °C (derajat celcius), °K (derajat kelvin).

2. Tekanan

Tekanan (p) adalah gaya yang bekerja secara vertikal pada bidang datar luas 1 cm^2 oleh benda padat, cair atau gas. Satuan yang dipakai untuk tekanan adalah Newton per-meter kuadrat (N/m^2), juga disebut Pascal (Pa). Tekanan atmosfer standar adalah 101.325 [Pa] .

3. Kalor spesifik

Kalor spesifik adalah energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur per satuan massa sebesar satu derajat. Biasanya dinotasikan dengan c , pada kalor spesifik terdapat dua besaran, kalor spesifik pada volume tetap (c_v) dan kalor spesifik pada tekanan tetap (c_p).

4. Entropi

Entropi (s) adalah salah satu besaran termodinamika yang mengukur energi dalam sistem per - satuan temperatur yang tak dapat digunakan untuk melakukan usaha. Entropi menyatakan ukuran ketidakteraturan suatu

sistem. Suatu sistem yang memiliki entropi tinggi berarti sistem tersebut makin tidak teratur. Sebagai contoh, jika gas dipanaskan maka molekul – molekul gas akan bergerak secara acak (entropinya tinggi) tetapi jika suhunya diturunkan gerak molekulnya menjadi lebih teratur (entropinya rendah).

2.4 Psikrometri

Psikrometri adalah ilmu yang membahas tentang sifat-sifat udara lembab. Sifat termal dari udara basah pada umumnya ditunjukkan dengan mempergunakan diagram psikrometri. Psikrometri merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air. Psikrometri mempunyai arti penting dalam teknik pengkondisian udara, karena udara atmosfer tidak sepenuhnya kering melainkan merupakan campuran antara udara dan uap air. Dalam hal tersebut dipakai beberapa istilah dan simbol sebagai berikut:

1. Temperatur bola kering (T_{DB})

Temperatur bola kering adalah temperatur yang terbaca pada termometer dengan sensor kering dan dalam keadaan terbuka.

2. Temperatur bola basah (T_{WB})

Temperatur bola basah adalah temperatur udara yang diukur dengan termometer biasa dengan sensor yang dibalut kain basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi.

3. Temperatur jenuh (T_{DP})

Temperatur jenuh adalah temperatur ketika uap air yang terkandung dalam udara mulai mengembun jika udara didinginkan pada temperatur konstan.

4. Rasio kelembaban (*humidity ratio*)

Rasio kelembaban adalah massa uap air yang terkandung dalam udara lembab per-satuan massa udara kering yang dapat didekati dengan persamaan berikut.

$$W = \frac{0,622 p_s}{p_t - p_s} \quad (\text{Stoecker; 1992:41}) \quad (2.1)$$

dimana :

W = rasio kelembaban [kg udara/kg udara kering]

p_t = tekanan atmosfer, dimana $p_t = p_a + p_s$ [Pa]

p_a = tekanan parsial udara kering [Pa]

p_s = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [Pa]

5. Kelembaban relatif (ϕ)

Kelembaban relatif adalah Perbandingan tekanan uap air terhadap tekanan uap air jenuh pada suhu konstan. Kelembaban relatif merupakan hasil perbandingan antara massa aktual uap air dari campuran udara terhadap massa uap air yang menjadi jenuh pada suhu konstan yang dinyatakan dalam satuan persen. Kelembaban relatif dapat dinyatakan dengan :

$$\phi = \frac{p_s}{p_w} \quad (\text{Stoecker; 1992:40}) \quad (2.2)$$

dimana :

ϕ = kelembaban relatif

p_s = tekanan parsial uap air [Pa]

p_t = tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama [Pa]

6. Volume spesifik (v)

Volume spesifik adalah volume ruang yang diisi oleh 1 kg udara kering dan dinyatakan dalam m^3/kg udara kering. Dari persamaan gas ideal, volume spesifik (v) adalah :

$$v = \frac{R_a T}{p_t - p_s} \quad (\text{Stoecker; 1992:43}) \quad (2.3)$$

dimana :

v = Volume spesifik [m^3/kg udara kering]

R_a = tetapan gas untuk udara kering [J/kg.K]

p_t = tekanan atmosfer [Pa]

p_s = tekanan parsial uap air [Pa]

7. Entalpi (h)

Entalpi adalah sifat termal dari campuran udara dan uap air yang menunjukkan intensitas kalor dalam udara lembab per-satuan massa udara kering di atas suhu acuan dan dinyatakan dengan [kJ/kg udara kering]. Persamaan dari entalpi adalah :

$$h = C_p t + W h_g \quad (\text{Stoecker, 1992:42}) \quad (2.4)$$

dimana :

h = entalpi [kJ/kg udara kering]

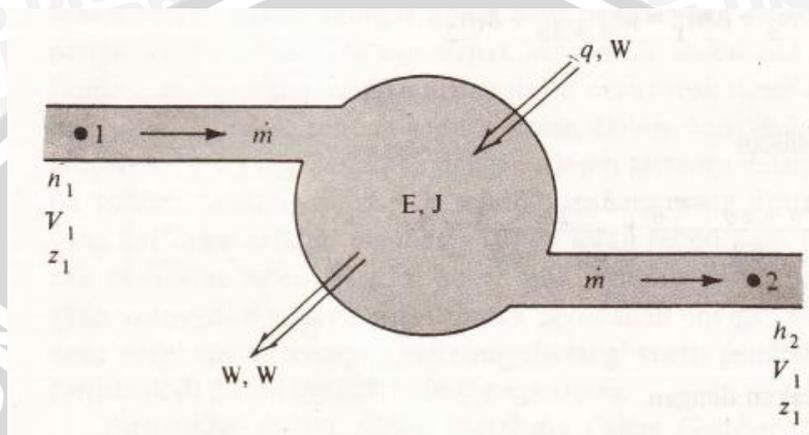
C_p = Kalor spesifik kering pada tekanan konstan = 1,0 [kJ/kg K]

t = Suhu campuran udara – uap [K]

h_g = Entalpi uap air (steam) jenuh pada suhu campuran udara–uap [kJ/kg]

2.5 Persamaan Energi Aliran Mantap

Dalam sistem refreragasi, laju aliran massa cenderung tetap sehingga laju aliran dianggap mantap. Keseimbangan energi menyatakan bahwa besarnya energi yang masuk dititik 1 ditambah besarnya energi yang ditambahkan berupa kalor, dikurangi dengan energi yang keluar dalam bentuk kerja yang meninggalkan sistem pada titik 2 sama dengan besarnya perubahan energi didalam volume kendali (Stoecker, 1992). Gambar 2.2 menunjukkan keseimbangan energi di dalam volume kendali.



Gambar 2.2 Keseimbangan energi pada sebuah volume atur yang sedang mengalami laju aliran mantap
Sumber : Stoecker (1992 : 20)

Persamaan energi dapat ditulis sebagai berikut (Stoecker, 1992) (2.5):

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) + Q - \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) - W = \frac{dE}{d\theta}$$

Oleh karena aliran steady tidak ada perubahan laju aliran massa pada sistem, maka laju aliran massa yang masuk pada titik 1 sama dengan laju aliran massa yang keluar pada titik 2. Demikian pula tidak ada perubahan harga energi sistem terhadap waktu sehingga $dE/d\theta = 0$

Persamaan energi aliran steady menjadi (Stoecker, 1992) (2.6) :

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) + Q = \dot{m} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) + W$$

dimana :

\dot{m} = Laju aliran massa [kg/s]

h = Entalpi [J/kg]

v = Kecepatan [m/s]

z = Ketinggian [m]

g = Percepatan gravitasi = 9,81 [m/s²] [m/s²]

Q = laju aliran energi dalam bentuk kalor [J/s]

W = Laju aliran energi dalam bentuk kerja [J/s]

E = Energi sistem [J]

2.6 Mesin Pendingin

Mesin pendingin adalah suatu alat yang digunakan untuk menyerap kalor pada suhu rendah untuk tujuan pendinginan dengan memanfaatkan efek dari luar. Mesin pendingin merupakan mesin yang mempunyai fungsi utama untuk mendinginkan zat sehingga temperaturnya lebih rendah dari temperatur lingkungan. Pendinginan dilakukan sesuai dengan tujuan masing-masing orang yang akan melakukan proses pendinginan tersebut.

2.6.1 Macam –macam mesin pendingin

A. Mesin pendingin menurut fungsinya

1. Refrigerator

Adalah suatu unit mesin pendingin dipergunakan dalam rumah tangga, untuk menyimpan bahan makanan atau minuman. Untuk menguapkan bahan pendingin di perlukan panas. Lemari es memanfaatkan sifat ini. Bahan pendingin yang digunakan sudah menguap pada suhu -20°C . Panas yang diperlukan untuk penguapan ini diambil dari ruang pendingin, karena itu suhu dalam ruangan ini akan turun. Penguapan berlangsung dalam evaporator yang ditempatkan dalam ruang pendingin. Karena sirkulasi udara, ruang pendingin ini akan menjadi dingin seluruhnya.

2. Freezer

Jenis yang satu ini tidak berbeda dengan kulkas, hanya saja kapasitas lebih besar, dan suhunya lebih rendah (-10°) – (40°) C.

3. Air conditioner (AC)

Air conditioner atau alat pengkondisi udara membantu manusia memberikan udara sejuk dan menyediakan uap air yang dibutuhkan bagi tubuh. Air conditioner bentuknya lebih kecil dari lemari es, tetapi tenaga motor listrik sebagai penggerak yang diperlukan jauh lebih besar. Proses pendinginan yang harus dilakukan yaitu untuk menyejukkan udara dalam suatu ruangan luas atau kamar, adalah jauh lebih lebih besar dari pada lemari.

4. Kipas angin

Walaupun pada dasarnya peralatan yang satu ini tidak menghasilkan udara atau suhu yang dingin sebagaimana kulkas atau AC, tetapi putaran dan sistem kerjanya mirip dengan kerja dari kedua peralatan diatas. Fungsi yang umum adalah untuk pendingin udara, penyegar udara, ventilasi (*exhaust fan*), penering.

B. Mesin pendingin menurut cara kerjanya

1. Mesin pendingin dengan siklus absorpsi (*Absorption Cycle*)

2. Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap (*Vapour Compression Cycle*)

Siklus kompresi uap disebut sebagai siklus yang dioperasikan oleh kerja (*work operated system*), karena kenaikan tekanan refrigeran dilakukan oleh kompresor yang memerlukan kerja dari luar. Sedangkan siklus absorpsi disebut sebagai siklus yang dioperasikan oleh kalor (*heat operated system*) karena sebagian besar biaya operasi berkaitan dengan pemberian kalor pada generator yang diperlukan untuk melepaskan uap (refrigeran) dari zat cair bertekanan tinggi. Siklus kompresi uap menggunakan satu jenis fluida yaitu refrigeran. Sedangkan siklus absorpsi menggunakan dua jenis fluida, yaitu refrigeran dan zat cair penyerap (*absorbing liquid*).

1. Mesin pendingin dengan siklus absorpsi (*Absorption Cycle*)

Siklus refrigerasi absorpsi adalah proses refrigerasi yang memanfaatkan dua jenis fluida dan sejumlah kecil masukan kalor, bukan masukan listrik seperti di sistem refrigerasi kompresi uap yang lebih sering dikenal. Pada dasarnya, sistem refrigerasi absorpsi tidak jauh berbeda dengan sistem kompresi uap. Perbedaan yang paling besar hanya ada pada kompresor yang telah digantikan dengan mekanisme absorpsi yang kompleks, yang terdiri dari absorber, pompa, generator, regenerasi/ heatexchanger, katup, dan sebuah rectifier/separator.

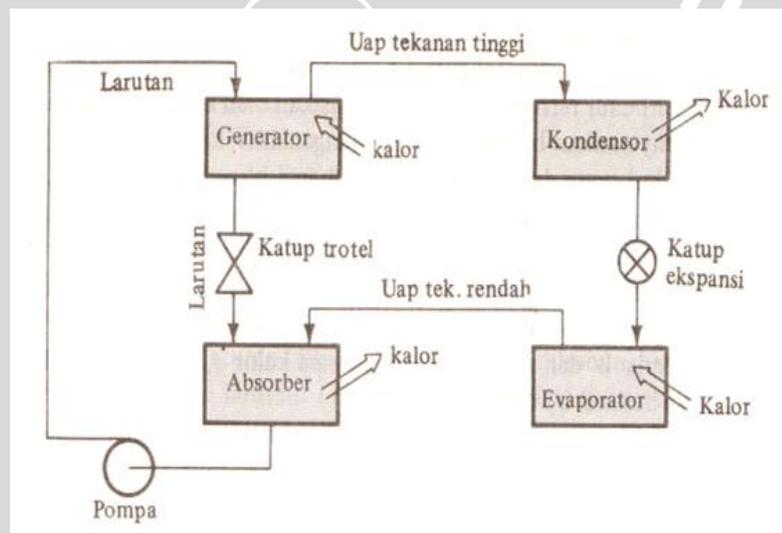
Sistem refrigerasi penyerapan uap terdiri dari:

- Absorber: Penyerapan uap refrigeran oleh absorben atau adsorben yang cocok, membentuk larutan refrigeran yang kuat atau kaya dalam absorben/ adsorben

- Pompa: Pemompaan larutan yang kaya dan menaikkan tekanannya ke tekanan kondenser
- Generator: Destilasi uap dari larutan kaya menisakan larutan miskin untuk pendaurlangan.

Chiller absorpsi merupakan sebuah mesin, yang menghasilkan *chilled water* dengan menggunakan panas seperti *steam*, air panas, gas, minyak, dll. *Chilled water* diproduksi berdasarkan prinsip bahwa cairan (yakni refrigeran, yang menguap pada suhu rendah) menyerap panas dari sekitarnya apabila menguap. Air murni digunakan sebagai refrigeran dan larutan *lithium bromide* digunakan sebagai absorben.

Instalasi mesin pendingin siklus absorpsi ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini :



Gambar 2.3 Daur siklus absorpsi
Sumber : Stoecker (1992 : 309)

Daur siklus absorpsi sendiri terlihat pada gambar 2.3 kerja kompresi dilakukan oleh sistem sebelah kiri diagram. Dimana uap tekanan rendah dari evaporator diserap oleh larutan cairan (*liquid solution*) dalam absorber. Jika proses absorpsi ini dilakukan secara adiabatik, suhu larutan naik dan akhirnya absorpsi uap akan berhenti. Untuk mengekalkan proses absorpsi, absorber didinginkan oleh udara atau air yang kemudian melepaskan kalor ke udara bebas. Pompa menerima zat cair tekanan rendah dari absorber, meninggikan tekanan zat cair, dan mengirimkan zat cair ke generator. Dalam generator, kalor dari

suatu sumber suhu tinggi mendorong lepas uap yang telah diserap oleh larutan. Larutan cair dikembalikan ke absorber melalui katup trotoar yang maksudnya adalah untuk memberikan penurunan tekanan guna menjaga beda tekanan antara generator dan absorber. Pola aliran kalor pada siklus absorpsi, kalor dengan suhu tinggi masuk ke generator sedangkan kalor suhu rendah dari bahan yang hendak didinginkan masuk ke dalam evaporator. Pelepasan kalor dari daur terjadi pada absorber dan kondensator pada suhu – suhu tertentu sehingga kalor dapat dibuang ke atmosfer.

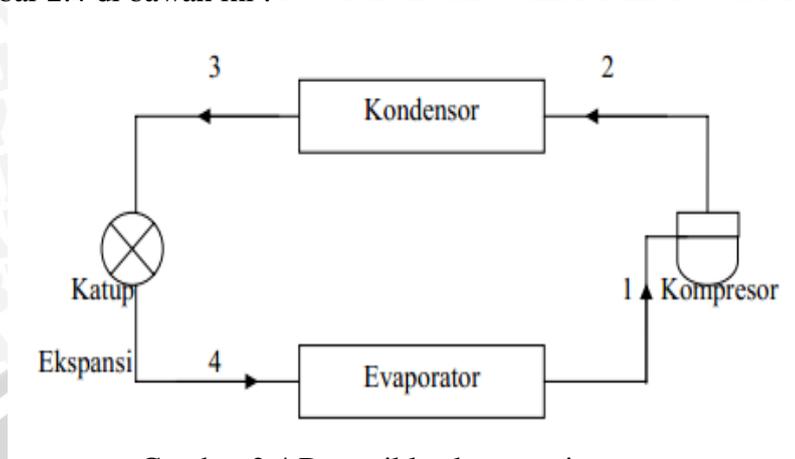
2. Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap (*Vapour Compression Cycle*)

Mesin pendingin dengan siklus kompresi uap merupakan mesin yang paling banyak digunakan pada refrigerasi. Pada siklus ini uap ditekan, kemudian diembunkan menjadi cairan, kemudian tekanannya diturunkan agar cairan tersebut dapat menguap kembali. Penyerapan panas pada siklus kompresi uap dilakukan dalam evaporator dengan temperatur dan tekanan rendah. Di dalam evaporator, refrigeran berubah dari fase cair menjadi fase gas, lalu masuk ke kompresor. Karena kerja kompresor, refrigeran menjadi gas bertemperatur dan bertekanan tinggi. Untuk melepaskan panas yang diserap oleh evaporator, refrigeran diembunkan di dalam kondensator sehingga refrigeran menjadi cair. Sebelum refrigeran memasuki evaporator, refrigeran diekspansikan terlebih dahulu oleh katup ekspansi. Pada alat ini tekanan refrigeran yang masuk ke evaporator diturunkan. Penurunan tekanan ini disesuaikan dengan kondisi yang diinginkan, sehingga refrigeran tersebut dapat menyerap cukup banyak kalor dari evaporator. Komponen utama dari siklus kompresi uap adalah kompresor, evaporator, kondensator dan katup ekspansi.

Pertimbangan pemilihan mesin pendingin siklus kompresi uap adalah :

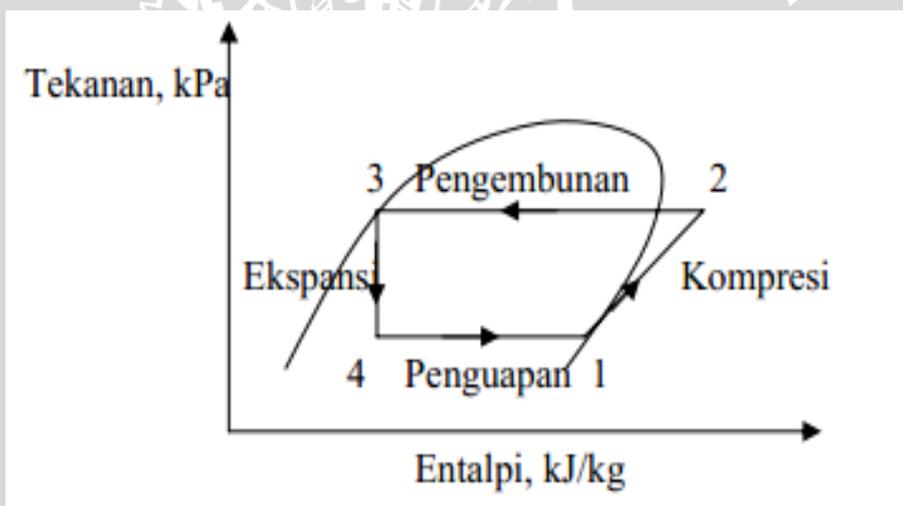
1. Konstruksinya sederhana
2. Pengoperasiannya mudah dan tahan lama
3. Bila terjadi kerusakan mudah diperbaiki

Instalasi mesin pendingin siklus kompresi uap ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini :



Gambar 2.4 Daur siklus kompresi uap
 Sumber : Stoecker (1992 : 187)

Siklus kompresi uap pada diagram tekanan – entalpi (p-h diagram) mesin pendingin siklus kompresi uap ditunjukkan oleh Gambar 2.5 sebagai berikut :



Gambar 2.5 Diagram tekanan–entalpi siklus kompresi uap
 Sumber : Stoecker (1992 : 187)

Proses yang terjadi pada siklus kompresi uap pada gambar adalah sebagai berikut:

- a. Proses kompresi (1-2)

Proses ini dilakukan oleh kompresor dan berlangsung secara isentropik. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk ke dalam kompresor adalah uap jenuh bertekanan rendah, setelah mengalami kompresi refrigeran akan menjadi uap bertekanan tinggi. Karena

proses ini berlangsung secara isentropik, maka temperatur ke luar kompresor pun meningkat.

b. Proses kondensasi (2-3)

Proses ini berlangsung didalam kondensor. Refrigeran yang bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi yang berasal dari kompresor akan membuang kalor sehingga fasanya berubah menjadi cair. Hal ini berarti bahwa di dalam kondensor terjadi pertukaran kalor antara refrigeran dengan lingkungannya (udara), sehingga panas berpindah dari refrigeran ke udara pendingin yang menyebabkan uap refrigeran mengembun menjadi cair.

c. Proses ekspansi (3-4)

Proses ekspansi ini berlangsung secara isoentalpi. Hal ini berarti tidak terjadi perubahan entalpi tetapi terjadi drop tekanan dan penurunan temperatur, proses penurunan tekanan terjadi pada katup ekspansi yang berbentuk pipa kapiler atau orifice yang berfungsi untuk mengatur laju aliran refrigeran dan menurunkan tekanan.

d. Proses evaporasi (4-1)

Proses ini berlangsung secara isobar isothermal (tekanan konstan, temperatur konstan) di dalam evaporator. Panas dari dalam ruangan akan diserap oleh cairan refrigeran yang bertekanan rendah sehingga refrigeran berubah fasa menjadi uap bertekanan rendah. Kondisi refrigeran saat masuk evaporator sebenarnya adalah campuran cair dan uap.

Selanjutnya, refrigeran kembali masuk ke dalam kompresor dan bersirkulasi lagi. Begitu seterusnya sampai kondisi yang diinginkan tercapai.

Siklus mesin pendingin dapat dijelaskan pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 dimana proses dimulai dari kompresor yang menekan refrigeran ke kondensor kemudian didinginkan (dibuang kalor) sehingga refrigeran menjadi cair. Dari kondensor, refrigeran masuk ke katup ekspansi kemudian diekspansikan sehingga tekanan dan temperaturnya turun (dikabutkan), fase refrigeran berubah dari cair menjadi uap jenuh. Selanjutnya refrigeran uap jenuh masuk ke evaporator, dengan

temperatur yang sudah rendah maka akan mampu menyerap kalor dari produk yang didinginkan. Dengan kata lain proses 1-2 adalah kompresi isentropik di sepanjang garis entropi konstan, mulai dari uap jenuh kering hingga tekanan pengembunan. Proses 2-3 merupakan penurunan panas lanjut dan pengembunan dengan tekanan tetap (Isobarik), yang merupakan garis lurus mendatar pada diagram tekanan-entalpi. Proses 3-4 berlangsung pada entalpi tetap, karena tegak lurus pada diagram tekanan-entalpi. Proses 4-1 merupakan garis lurus mendatar karena aliran refrigeran melalui evaporator dianggap mempunyai tekanan tetap.

2.6.2 Bagian – bagian mesin pendingin

secara garis besar komponen sistem pendingin siklus kompresi uap terdiri dari :

1. Kompresor

Kompresor mempunyai klasifikasi yang bermacam – macam, akan tetapi pada umumnya dapat dibagi menjadi dua jenis utama yaitu :

1. Kompresor langkah positif, dimana gas diisap masuk ke dalam silinder dan dikompresikan .
2. Kompresor dinamis, dimana gas yang dihisap masuk dipercepat alirannya oleh sebuah impeller yang kemudian mengubah energi kinetik untuk menaikkan tekanan.

Fungsi kompresor antara lain :

1. Mensirkulasikan bahan pendingin (*refrigerant*)
2. Menaikkan tekanan agar bahan pendingin dapat berkondensasi pada kondisi ruangan
3. Mempertahankan tekanan yang konstan pada evaporator
4. Menghisap gas bertekanan dan bertemperatur rendah dari evaporator, kemudian menekan/memampatkan gas tersebut, sehingga menjadi gas yang bertekanan dan suhu tinggi, lalu dialirkan ke kondensor.

Pada pengujian ini menggunakan AC dengan kompresor jenis hermatik, dimana pada kompresor hermatik, motor dan kompresor dimasukkan bersama dalam rumah kompresor. Rumah kompresor ini terbuat dari baja seperti terlihat pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Kompresor rotari

Efisiensi kompresor dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara daya kompresi teoritik dengan daya kompresi sebenarnya. Daya kompresi teoritik ialah selisih antara entalpi sisi keluar dan sisi masuk refrigeran dikali dengan laju aliran massa refrigeran, sedangkan daya aktual dapat dilihat pada mesin. Efisiensi kompresi pada umumnya mengalami penurunan dari keadaan idealnya. Hal ini dikarenakan adanya gesekan pada permukaan yang bersentuhan dengan bagian-bagian yang bergerak dan penurunan tekanan melalui katup – katupnya. Kerja kompresi dari kompresor (w) adalah kerja yang dilakukan kompresor untuk meningkatkan tekanan refrigeran dari tekanan evaporator (p_1) menuju tekanan kondensor (p_2). Nilainya sebesar selisih entalpi antara sisi keluar kompresor (h_2) dan sisi masuknya (h_1). Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$h_1 + q = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.7)$$

karena proses berjalan secara adiabatik maka q bernilai nol sehingga persamaan menjadi :

$$w = (h_2 - h_1) \text{ [kJ.kg}^{-1}\text{]} \quad (\text{Stoecker; 1994:186}) \quad (2.8)$$

dengan :

$$h_1 = \text{Entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap [kJ.kg}^{-1}\text{]}$$

h_2 = Entalpi refrigeran pada daerah panas lanjut [kJ.kg^{-1}]

Dengan bertambahnya massa refrigeran yang masuk kedalam ruang silinder yang melalui katup isap menyebabkan semakin bertambahnya massa refrigeran dalam silinder. Akibatnya, tekanan untuk mengeluarkan massa refrigeran semakin besar. Hal ini menyebabkan daya kompresor yang dibutuhkan semakin besar. Untuk menghasilkan daya kompresor yang besar diperlukan torsi yang besar dan putaran lengan torak yang semakin besar.

2. Kondensor

Kondensor merupakan suatu komponen sistem refrigerasi yang dapat melepas kalor yang dikandung oleh refrigeran sehingga refrigeran yang mula-mula berbentuk uap akan menjadi cair. Kondensor akan mengubah uap tekanan tinggi tersebut menjadi cairan bertekanan tinggi dengan adanya medium pendingin pada kondensor (*udara maupun cair*). Kalor dari ruangan dan panas dari kompresor akan diserap medium pendingin. Kondensor ditunjukkan pada gambar 2.7 di bawah ini :



Gambar 2.7 Kondensor

Untuk meningkatkan jumlah kalor yang dilepas maka diperlukan bantuan hembusan udara dengan menggunakan kipas atau blower. Dalam kondensor dibutuhkan pelepasan kalor untuk mencairkan refrigeran yang bertekanan dan bertemperatur tinggi setelah keluar dari kompresor. Jumlah kalor yang dilepaskan tiap detiknya oleh uap refrigeran ke udara yang dihembuskan melalui kondensor sama dengan selisih entalpi refrigeran pada sisi masuk dan pada sisi keluar kondensor dikali dengan laju aliran massanya. Pelepasan kalor

dalam kilojoule per kilogram adalah perpindahan kalor dari refrigeran pada proses 2-3, sesuai persamaan berikut :

$$h_3 + q_c = h_2 + w \quad (\text{Stoecker; 1994}) \quad (2.9)$$

karena tidak dilakukan kerja maka :

$$q_c = h_2 - h_3 \quad (\text{Stoecker, 1994}) \quad (2.10)$$

dengan :

$$q_c = \text{pelepasan kalor dari kondensor} \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$h_3 = \text{entalpi refrigeran pada daerah saturasi cair} \quad [\text{kJ/kg}]$$

3. Alat ekspansi

Alat ekspansi adalah alat yang digunakan untuk menurunkan tekanan refrigeran sehingga refrigeran cair berubah menjadi uap jenuh. Pipa kapiler dibuat dari tembaga dengan diameter lubang dalam yang sangat kecil. Panjang dan lubang pipa kapiler dapat mengontrol jumlah bahan pendingin yang masuk evaporator. Karena tekanan dan temperatur cairan dari kondensor terlalu tinggi untuk terjadinya penguapan dalam kondisi ruangan, maka digunakan pipa kapiler (*liquid control device*) yang bekerja sebagai suatu tahanan aliran fluida (bahan pendingin cair). Dengan adanya tahanan tersebut, tekanan fluida akan turun dan sebagian kecil cairan pendingin menguap (*flash gas*). Penguapan ini akan menyerap kalor dari cairan pendingin, sehingga temperatur cairan berkurang sampai temperatur jenuh pada tekanan yang berkurang tersebut. Pipa kapiler (*capillary tube*) berguna untuk :

- Menurunkan tekanan bahan pendingin cair yang mengalir didalamnya.
- Mengatur jumlah tekanan bahan pendingin cair yang mengalir melaluinya.
- Membangkitkan tekanan bahan pendingin dikondensor

Alat ekspansi yang sering digunakan adalah katup ekspansi termostatik dan pipa kapiler. Katup ekspansi termostatik (*Thermostatic Expansion Valve*) / TXV merupakan katup ekspansi berkendali panas lanjut yang berfungsi agar refrigeran yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani. Jika beban bertambah, maka cairan refrigeran di evaporator akan lebih banyak menguap, sehingga besarnya suhu panas lanjut di evaporator akan meningkat. Pada akhir evaporator diletakkan tabung sensor suhu dari TXV tersebut. Peningkatan suhu dari evaporator akan menyebabkan uap atau cairan yang terdapat di tabung sensor suhu tersebut akan menguap (terjadi pemuaian) sehingga tekanannya meningkat. Pipa kapiler berfungsi sebagai alat ekspansi

dengan memanfaatkan tahanan gesek refrigeran terhadap pipa, sehingga tekanannya turun. Pipa kapiler biasanya mempunyai diameter yang kecil (0,031 – 0,054 inch) dengan panjang 5 – 20 ft. Pipa kapiler digunakan karena kemudahannya dan murah. Alat ekspansi dapat ditunjukkan oleh gambar 2.8 di bawah ini :



Gambar 2.8 Alat ekspansi

4. Evaporator

Evaporator adalah penukar kalor yang berfungsi untuk mendinginkan media sekitarnya. Berdasarkan konstruksinya evaporator dibedakan atas jenis tabung-koil, tabung-pipa jenis ekspansi kering dan jenis koil pendingin udara. Pada evaporator biasanya digunakan sirip-sirip untuk memudahkan terjadinya perpindahan panas dari refrigeran yang diuapkan dengan cara diturunkan tekanannya pada siklus sehingga terjadi penurunan suhu pada refrigeran tersebut. Bentuk dan konstruksi evaporator tidak berbeda dari kondensor, tapi fungsi kedua alat ini berlainan.



Gambar 2.9 Evaporator

Pada kondensor panas zat pendingin harus dikeluarkan agar terjadi perubahan bentuk zat pendingin dari gas ke cair. Prinsip ini berlaku sebaliknya pada evaporator, zat pendingin cair dari kondensor harus berubah kembali menjadi gas dalam evaporator, dengan demikian evaporator harus menyerap panas. Agar penyerapan panas ini dapat berlangsung dengan sempurna, pipa-pipa evaporator juga diperluas permukaannya dengan memberi kisi-kisi (elemen) dan kipas listrik (blower), supaya udara dingin juga dapat dihembuskan ke dalam ruangan. Pada rumah evaporator bagian bawah dibuat saluran atau pipa untuk keluarnya air yang mengumpul disekitar evaporator akibat udara yang lembab. Air ini juga akan membersihkan kotoran-kotoran yang menempel pada kisi-kisi evaporator, karena kotoran itu akan turun bersama air.

Pada evaporator besar nilai kalor yang diserap oleh refrigeran merupakan selisih entalpi refrigeran pada sisi keluar evaporator dan sisi masuk evaporator. Hal tersebut dapat dilihat pada persamaan aliran energi mantap, dimana energi kinetik, energi potensial dan kerja diabaikan sehingga persamaannya menjadi berikut :

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (\text{Stoecker; 1994}) \quad (2.11)$$

dengan :

q_e = penyerapan kalor oleh refrigeran dalam evaporator [kJ/kg]

h_1 = entalpi refrigeran pada daerah saturasi uap [kJ/kg]

h_4 = entalpi refrigeran pada daerah campuran [kJ/kg]

Di dalam evaporator perbedaan temperatur rata-rata digunakan untuk menghitung perpindahan kalor, dimana makin besar perbedaan temperatur rata-rata makin kecil ukuran permukaan luas perpindahan kalor. Namun dalam hal tersebut temperatur penguapan menjadi semakin rendah, sehingga kemampuan kompresor akan berkurang. Oleh karena itu perbedaan temperatur rata-rata ditetapkan dengan memperhatikan pertimbangan faktor penukar kalor. Pada evaporator terjadi dampak atau efek pendinginan yang apabila dikalikan dengan laju aliran masa refrigeran akan merupakan nilai dari kapasitas refrigerasi atau pendinginan untuk AC.

2.6.3 Dasar – dasar Perhitungan Unjuk Kerja Mesin Pendingin

Dasar – dasar perhitungan unjuk kerja mesin pendingin siklus kompresi uap standar berlandaskan pada diagram hubungan temperatur (T) dengan entropi (s) dan tekanan (P) dengan entalpi (h) untuk siklus kompresi uap standar.

1. Efek refrigerasi

Efek refrigerasi adalah banyaknya kalor yang diserap oleh evaporator setiap satuan massa refrigeran untuk menghasilkan efek pendinginan. Efek refrigerasi merupakan parameter penting, karena merupakan efek yang berguna dan diinginkan dari suatu sistem mesin pendingin. Dari gambar 2.5 di atas, dapat dilihat bahwa efek refrigerasi ini berlangsung pada proses dari 4 ke 1 atau titik sebelum masuk evaporator dan keluar evaporator. Makin besar efek refrigerasi suatu sistim refrigerasi, maka kinerja sistem makin baik.

Besarnya efek refrigerasi tersebut adalah :

$$q_1 = (h_1 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.12)$$

dimana :

h_1 = entalpi refrigeran keluar evaporator [kJ/kg]

h_4 = entalpi refrigeran masuk evaporator [kJ/kg]

2. Kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran (kJ/kg). Besarnya kerja kompresi (w) sama dengan selisih entalpi uap refrigeran yang keluar kompresor dengan entalpi uap refrigeran yang masuk ke kompresor pada proses 1–2 gambar 2.5 diatas.

$$w = h_2 - h_1 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2.13)$$

dimana :

h_1 = entalpi refrigeran masuk kompresor [kJ/kg]

h_2 = entalpi refrigeran keluar kompresor [kJ/kg]

Hubungan tersebut diturunkan dari persamaan energi dalam keadaan tunak (*steady flow energy equation*) yaitu : $q + h_1 = h_2 + w$ pada proses kompresi adiabatik reversibel dengan perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan. Perbedaan entalpinya merupakan besaran negatif yang menunjukkan bahwa kerja diberikan kepada sistem.

3. Koefisien prestasi

Koefisien prestasi (COP = *Coefficient Of Performance*) merupakan perbandingan antara kapasitas pendinginan (Q_{ref}) dengan daya kompresor

(P_{com}) yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor. Untuk satu – satuan massa refrigeran maka unjuk kerja dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara efek refrigerasi (q) sistim dengan kerja kompresor (w) yang dibutuhkan untuk mengkompresi refrigeran di kompresor. Makin besar nilai unjuk kerja (COP) makin baik kinerja sistim refrigerasi itu. Unjuk kerja (COP) merupakan besaran tanpa dimensi. Koefisien prestasi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{COP} = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{Q_{ev}}{W_{comp}} \quad (2.14)$$

$$= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

Unjuk kerja merupakan parameter yang sangat penting di dalam system pendingin, karena semakin besar harga unjuk kerja (COP) maka semakin baik kerja dari sistem pendingin tersebut. Unjuk kerja ini identik dengan efisiensi pada motor bakar. Kalau efisiensi biasanya nilainya lebih kecil dari 1 sedangkan unjuk kerja biasanya lebih besar dari 1.

2.7 Refrigeran

Refrigeran adalah media perpindahan panas yang menyerap panas atau kalor dengan penguapan (evaporator) pada temperatur rendah dan memberikan kalor dengan pengembunan (kondensor) pada temperatur dan tekanan tinggi. Refrigeran bersirkulasi di dalam mesin pendingin yang mana fasenya bisa dirubah dari uap menjadi cair atau pun sebaliknya. Untuk sistem refrigerasi kompresi uap, refrigeran menyerap panas di dalam evaporator pada temperatur dan tekanan rendah serta melepaskan panas pada kondensor pada tekanan serta temperatur tinggi.

2.7.1 Macam – macam refrigeran

1. Refrigeran primer

Refrigeran primer adalah zat yang berfungsi sebagai media pendingin dengan menyerap kalor dari benda atau bahan lain seperti air atau udara ruangan, sehingga refrigeran tersebut dapat dengan mudah merubah fasenya dari cair menjadi gas. Sedangkan pada saat terjadinya pelepasan kalor oleh refrigeran terjadi perubahan fase dari gas bertekanan tinggi jenuh menjadi cair.

Refrigeran primer yang biasa digunakan dapat digolongkan sebagai berikut :

a. Senyawa Halokarbon

Refrigeran yang memiliki satu atau lebih atom dari salah satu halogen yang tiga (*klirin, fluorin, bromin*). Ketentuan bilangan, nama kimia, dan rumus kimia sejumlah anggota kelompok ini yang ditemukan diperdagangan, dimuat dalam tabel berikut :

Table 2.1 beberapa senyawa halocarbon

Ketentuan penomoran	Nama Kimia	Rumus Kimia
R-11	Trikloromonofluorometana	CCl_3F
R-12	Diklorodifluorometana	CCl_2F_2
R-13	Monoklorotrifluorometana	CClF_3
R-22	Monoklorodifluorometana	CHClF_2
R-40	Meniklorida	CCH_3Cl
R-113	Triklorotrifluoroetan	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$
R-114	Diklorotetrafluoroetana	$\text{CClF}_2\text{CClF}_2$

Sumber : Stoecker (1992:279)

b. Senyawa Hidrokarbon

Banyak senyawa hidrokarbon yang cocok digunakan sebagai refrigeran, khususnya dipakai untuk industri perminyakan dan petrokimia.

Tabel 2.2 Beberapa senyawa hidrokarbon

Ketentuan penomoran	Nama Kimia	Rumus Kimia
50	Metana	CH_4
170	Etana	C_2H_6
290	Propana	C_3H_8

Sumber : Stoecker (1992:280)

c. Senyawa Anorganik

Senyawa anorganik sering digunakan pada masa awal perkembangan bidang refrigerasi dan pengkondisian udara.

Tabel 2.3 Beberapa senyawa anorganik

Ketentuan penomoran	Nama Kimia	Rumus Kimia
717	Amoniak	NH ₃
718	Air	H ₂ O
729	Udara	O ₂
744	Karbon dioksida	CO ₂
764	Sulfur dioksida	SO ₂

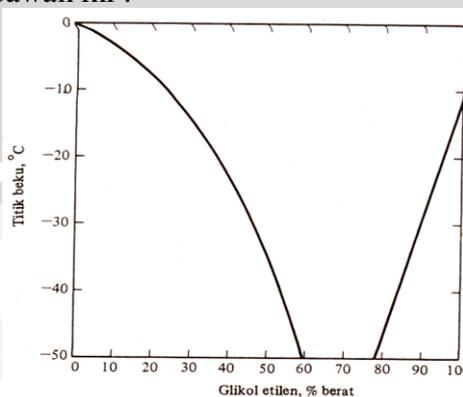
Sumber : Stoecker (1992:280)

d. Azeotrop

Campuran Azeotrop dua substansi adalah campuran yang tidak dapat dipisahkan menjadi komponen-komponennya dengan cara destilasi. Azeotrop menguap dan mengembun sebagai substansi tunggal yang sifatnya berbeda dengan sifat pembentukannya. Azeotrop yang paling banyak dikenal adalah R-502 yang merupakan campuran 48,8% R-22 dan 51,2% R-115.

2. Refrigeran sekunder

Refrigeran sekunder adalah fluida yang mengangkut kalor dari bahan yang sedang didinginkan ke evaporator pada sistem refrigerasi. Refrigeran sekunder mengalami perubahan temperatur bila menyerap kalor dan membebaskannya pada evaporator, tetapi tidak mengalami perubahan fasa. Anti beku yang banyak digunakan adalah larutan air dan *glikol etalin*, *glikol propelin*, ataupun *kalsium klorida*. Salah satu sifat larutan anti beku yang penting adalah titik pembekuannya, yang tampak dalam gambar 2.10 dibawah ini :



Gambar 2.10 Titik beku larutan – larutan glikol etilen

Sumber :Stoecker (1992 : 284)

2.7.2 Syarat – syarat refrigeran

Dalam menentukan refrigeran yang akan digunakan, maka harus mengetahui sifat – sifat refrigeran sebagai berikut :

1. Tekanan penguapan harus tinggi
Tekanan penguapan yang tinggi mencegah kemungkinan terjadinya kebocoran udara kedalam sistem selama operasi.
2. Tekanan pembekuan yang rendah
Suhu pembekuan harus cukup rendah, agar pemadatan refrigeran tidak terjadi selama operasi normal.
3. Kalor laten penguapan harus tinggi
Refrigeran yang memiliki kalor laten penguapan yang tinggi lebih menguntungkan karena untuk kapasitas refrigerasi yang sama, jumlah refrigerant yang bersikulasi menjadi lebih kecil. Kalor laten penguapan adalah jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan satu kilogram cairan jenuh pada temperature atau tekanan tertentu.
4. Konduktivitas termal yang tinggi
Konduktivitas termal sangat penting untuk menentukan karakteristik perpindahan panas refrigeran.
5. Viskositas yang rendah dalam fase gas maupun cair
Dengan turunnya tahanan aliran refrigeran dalam pipa, kerugian tekanannya akan berkurang.
6. Tidak bereaksi dengan material yang dipakai
7. Tidak beracun dan menimbulkan polusi
8. Tidak mudah terbakar dan meledak
9. Harganya terjangkau atau murah

Sifat-sifat di atas jarang sekali dijumpai pada refrigeran yang mempunyai sifat secara mutlak memuaskan untuk semua sistem pendingin.

2.7.3 Refrigeran Musicool (MC-22)

Refrigeran musicool (MC-22) adalah refrigeran dengan bahan dasar hidrokarbon alam dan termasuk dalam kelompok refrigeran ramah lingkungan, dirancang sebagai alternative pengganti refrigeran sintetik kelompok halokarbon CFC R-12, HCFC R-22 dan HFC R-134a yang masih memiliki potensi merusak alam. Pemakaian musicool (MC-22) pada sistem refrigerasi yang sebelumnya menggunakan refrigeran sintetik, tidak memerlukan penggantian komponen

maupun pelumas, dengan kata lain bersifat “*Drop in Substitute*”, karena musicool tidak memiliki efek terhadap logam, desikan, pelumas, dan elastomer (kecuali elastomer berbahan dasar karet alam).

Musicool (MC-22) telah memenuhi persyaratan teknis sebagai refrigeran yaitu meliputi aspek sifat fisika dan termodinamika. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan beban pendingin yang sama, musicool (MC-22) memiliki keunggulan – keunggulan dibandingkan dengan refrigeran sintetis, diantaranya beberapa parameter memberikan indikasi data lebih kecil, seperti kerapatan bahan (*density*), rasio tekanan kondensasi terhadap evaporasi dan nilai viskositasnya, sedangkan beberapa parameter lain memberikan indikasi data lebih besar, seperti efek refrigerasi, COP, kalor laten dan konduktivitas bahan.

Kelebihan menggunakan musicool :

1. Ramah Lingkungan dan Nyaman, musicool tidak beracun, tidak membentuk gum, nyaman dan pelepasannya ke alam bebas tidak akan merusak lapisan ozon dan tidak menimbulkan efek pemanasan global. Hidrokarbon tidak menyebabkan kerusakan ozon dan pemanasan global karena ODP yang dimiliki nol dan GWP-nya kecil.
2. Hemat Energi, musicool mempunyai sifat termodinamika yang lebih baik sehingga dapat menghemat pemakaian energi hingga 25% dibanding dengan refrigeran *fluorocarbon* pada kapasitas mesin pendingin yang sama.
3. Lebih Irit, musicool memiliki sifat kerapatan yang rendah sehingga hanya memerlukan sekitar 30% dari penggunaan refrigeran *fluorocarbon* pada kapasitas mesin pendingin yang sama.
4. Pengganti Untuk Semua, musicool dapat menggantikan refrigeran yang digunakan selama ini tanpa mengubah atau mengganti komponen maupun pelumas.
5. Produk dalam negeri (Pertamina), bahan baku banyak, dan *Supply* terjamin karena hidrokarbon tersedia diseluruh dunia tanpa hak paten, sehingga diproduksi secara bebas di negara manapun termasuk Indonesia, tidak seperti refrigeran sintetis yang hanya diproduksi oleh perusahaan tertentu.

Adapun kelemahan musicool/hidrokarbon adalah mudah terbakar, sehingga diperlukan adanya aturan penggunaan yang harus dipenuhi dan prosedur penggantian yang aman.

2.8 Subcooling

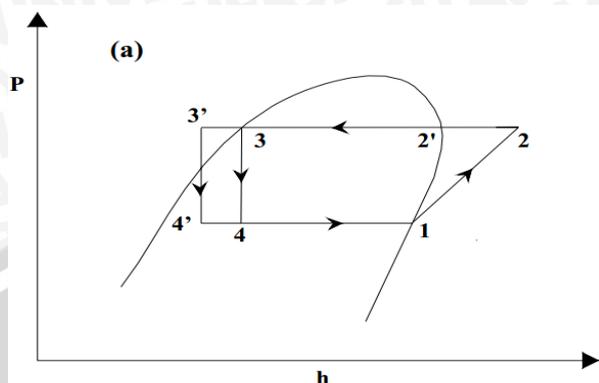
Subcooling adalah proses penurunan suhu refrigeran setelah melalui titik *saturated liquid*, kondisi dimana refrigeran cair lebih dingin dari suhu minimum. *Subcooling* diperlukan untuk menjaga dari mendidihnya refrigeran oleh karena perubahan dari cair ke fase gas dan wujud refrigeran disebut *subcooled liquid*. Besarnya pendinginan lanjut yang terjadi di kondenser ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur kondensasi dengan temperatur yang terukur di akhir kondensor. *Subcooling* merupakan salah satu modifikasi mesin pendingin yang bertujuan untuk mendapatkan nilai COP yang lebih tinggi dari pada tanpa menggunakan *subcooling*.

Fungsi dari kondensor adalah merubah wujud refrigeran dari uap atau gas menjadi refrigeran dengan bentuk cair. Proses perubahan dari gas ke cair ini dilakukan dengan membuang kalor yang ada pada refrigeran ke lingkungan sekitarnya pada suhu dan tekanan konstan. Dalam kondensor kalor dibuang dengan cara konveksi yaitu meniupkan udara yang mempunyai temperatur lebih rendah dari refrigeran melewati kondenser sehingga terjadi perpindahan kalor. Proses perpindahan kalor ini dimaksimalkan dengan adanya sirip-sirip pada kondensor dan aliran udara yang cukup dan bebas dari hambatan. Proses kondensasi atau perubahan dari wujud gas ke cair ini terjadi didalam pipa kondenser dan terjadi pada kondisi tekanan dan temperature tetap. Pada sistem refrigerasi, proses kondensasi adalah proses dari titik 2 ke titik 3. Pada titik 3 idealnya seluruh refrigeran telah berwujud cair jenuh (*saturated liquid*). Jika pemilihan ukuran kondenser tidak tepat ataupun sirip-sirip kondensor kotor maka pada ujung kondenser belum tentu semua refrigeran telah berbentuk cair. Suhu/temperatur pada waktu proses kondensasi ini terjadi masih lebih tinggi dari temperatur udara disekitarnya. Oleh karena itu refrigeran yang mengalir keluar dari kondensor menuju TXV melalui “*filter drier*” masih akan mengalami proses perpindahan kalor yang akan menurunkan suhu refrigerant lebih rendah lagi dari suhu cair jenuhnya (*saturated liquid*). Proses penurunan suhu setelah melalui titik “*saturated liquid*” ini disebut proses *subcooling*.

Subcooling bermanfaat karena mencegah refrigeran cair berubah menjadi gas sebelum masuk ke evaporator, karena setelah keluar kondensor tidak semua refrigeran sudah cair. *Subcooling* juga meningkatkan efisiensi sistem karena terjadi penurunan temperatur setelah keluar kondensor sehingga entalpi juga ikut turun.

2.8.1. Siklus mesin pendingin dengan *subcooling*

Siklus mesin pendingin dengan *subcooling* ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut ini :



Gambar 2.11 Diagram tekanan – entalpi *subcooling*

Pada siklus p-h (tekanan-entalpi) diatas terlihat bahwa dengan proses *subcooling*, maka efek refrigerasi yang dihasilkan lebih besar. Proses *subcooling* menjadi (1 – 2 – 3' – 4').

Pada siklus mesin pendingin standar nilai efek refrigerasi dan kerja kompresi,

$$q_1 = (h_1 - h_4) \quad (2.15)$$

$$W = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right] \quad (2.16)$$

Sehingga nilai COP,

$$\text{COP} = \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 - h_4}{\frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]} \quad (2.17)$$

Pada siklus mesin pendingin dengan *subcooling*, nilai efek refrigerasi dan kerja kompresi,

$$Q_{\text{sub}} = (h_1 - h_4') \quad (2.18)$$

$$W = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right] \quad (2.19)$$

Sehingga nilai COP_{sub},

$$\text{COP} = \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 - h_4'}{\frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]} \quad (2.20)$$

Baik efek refrigerasi dan kerja kompresi dengan proses *subcooling* sama-sama mengalami peningkatan. Tapi peningkatan yang dialami efek refrigerasi lebih besar daripada yang dialami kerja kompresi. Maka dapat disimpulkan bahwa nilai COP dengan proses *subcooling* lebih besar dibandingkan dengan COP standar.

2.9 Hipotesa

Pengaruh dari penambahan *subcooling* setelah kondensor akan menyebabkan temperatur refrigeran keluar kondensor turun dan mengakibatkan nilai entalpi juga turun sehingga akan meningkatkan nilai efek refrigerasi dan COP dari mesin pendingin akan meningkat, sedangkan penggantian refrigeran R-22 dengan MC-22 akan lebih menghemat energi dan lebih irit dalam pemakaian refrigeran.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mendapatkan data empiris. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mesin Pendingin, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah :

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya dapat diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari obyek penelitian, sehingga dapat diperoleh hubungan antara keduanya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah beban pendinginan dengan jalan memvariasikan laju alir massa udara. Adapun variasi laju alir massa udara yang dipilih adalah 0.0654; 0.075; 0.085; 0.094; 0.103 [kg/s] dan tingkat *subcooling* 6; 7 dan 8 [°C].

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung dari variable bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah:

- Efek refrigerasi
- Kerja kompresi
- Koefisien prestasi

3. Variabel kontrol (*control variable*)

Variabel kontrol adalah variabel yang telah ditentukan nilainya sebelum penelitian dan variabel yang nilainya dikonstantkan. Dalam penelitian ini variabel kontrolnya adalah *heater* dan *boiler* sebesar 2 (kW)

3.3 Alat – Alat yang Digunakan

1. AC Bench PA Hilton

Spesifikasi alat :

- Tipe : A-573/41154 *Vapour Compression Refrigeration Units*
- Produk : Udara lewat Air Flow Ducts dengan parameter yang bervariasi
- Kondensor
 - Merk : Alexman
 - Daya : 12 / 16 W
 - Arus : 0,55 A
 - Putaran : 1300 rpm
- Kompresor
 - Merk : PANASONIC
 - Type : 535001 M 12 00022
 - Daya : 1200 Watt ; 220Volt ; 50 Hz
- Blower
 - Fan Type : 90 G 2 WL
 - Air Blower : 660 liter/sec
 - MAT : 40°C

Instalasi AC Bench PA Hilton ditunjukkan pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Instalasi AC Bench PA Hilton

2. Refrigeran Musicool (MC-22)

Refrigeran yang digunakan pada penelitian ini adalah MC-22.

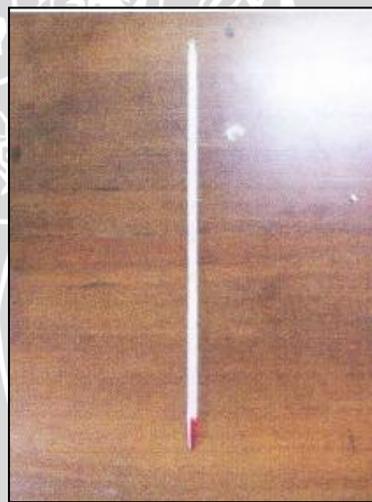
Tabel 3.1 karakteristik refrigeran MC-22

No	PARAMETER	MC-22
1	Panas Jenis Cairan Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, Kj/Kg	2,909
2	Panas Jenis Uap Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, Kj/Kg	2,238
3	Konduktivitas Termal Cairan Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, w/m	0,0868
4	Konduktivitas Termal Uap Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, w/m	0,0211
5	Kerapatan Cairan Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, (kg/m^3)	471,30
6	Kerapatan Cairan Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, (kg/m^3)	28,53
7	Kerapatan Uap Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, (kg/m^3)	2,412
8	Viskositas Cairan Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, (uPa-s)	84,58
9	Viskositas Uap Jenuh pd $37,8^{\circ}\text{C}$, (uPa-s)	9,263

3. Alat ukur sebagai berikut :

a. Termometer bola kering

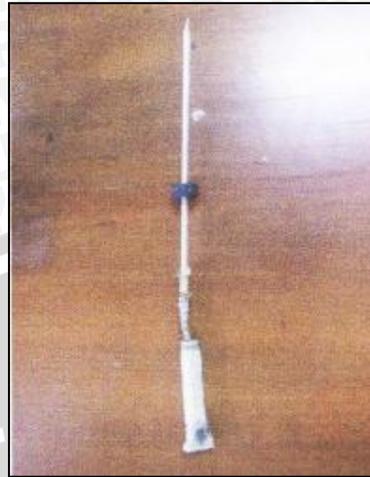
Berfungsi untuk mengetahui temperatur udara.



Gambar 3.2 Termometer bola kering

b. Termometer bola basah

Berfungsi untuk mengetahui temperatur udara tanpa pengaruh radiasi.



Gambar 3.3 Termometer bola basah

4. Tachometer

Berfungsi untuk mengetahui kecepatan putaran blower dengan satuan[rpm]. Tachometer ditunjukkan pada Gambar 3.4

Spesifikasi :

- *Display* : 5 digits, 10mm(0,4") LCD (*Liquid Crystal Display*).
- *Test Range* : 2,5 sampai 99,999 RPM (r/min)
- *Accuracy* : $\pm (0,05\% + 1 \text{ digit})$
- *Battery* : 4 X 1.5 V AA (UM-3) battery



Gambar 3.4 Tachometer

5. Mesin Vakum Refrigeran

Berfungsi untuk mengkosongkan refrigeran dalam sistem mesin pendingin.

Spesifikasi :

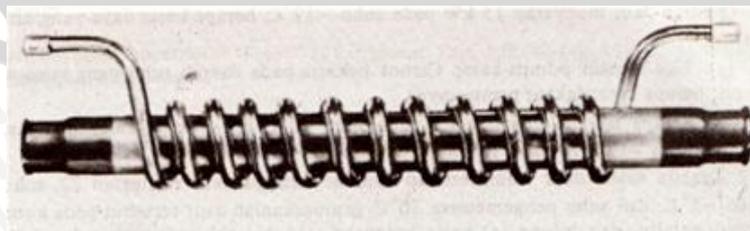
- *Model* : VE 115 N
- *Flow Rate* : 57 L/min
- *Ultimate Vacuum* : 150 micron
- *Voltage* : 230 V / 50-60 Hz
- *Power* : ¼ HP
- *Oli Capacity* : 250 ml



Gambar 3.5 Mesin Vacuum Refrigeran

6. Subcooler

Alat yang digunakan untuk menurunkan temperatur refrigeran keluar kondensor.

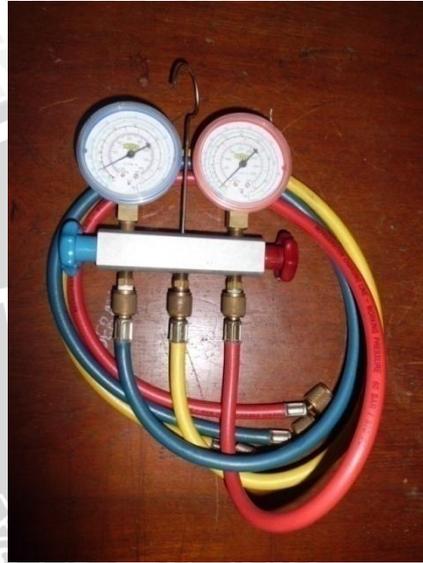


Gambar 3.6 subcooler

Sumber : Stoecker (1992 : 191)

7. Manifold

Berfungsi untuk memasukkan refrigeran Musicool-22 ke dalam sistem mesin pendingin.



Gambar 3.7 Manifold

8. Pompa air

Digunakan untuk memompa air yang masuk dalam *subcooler*.

Spesifikasi:

- Merk : DAB
- Maximal Capacity : 43 Lt/min
- Total Head : 33 m
- RPM : 2850



Gambar 3.8 Pompa

9. Bak penampung air

Berfungsi untuk menampung air yang akan dialirkan pompa ke *subcooler*.

10. Digital Thermometer

Digunakan untuk mengetahui temperatur refrigeran dengan satuan [°C].

Spesifikasi:

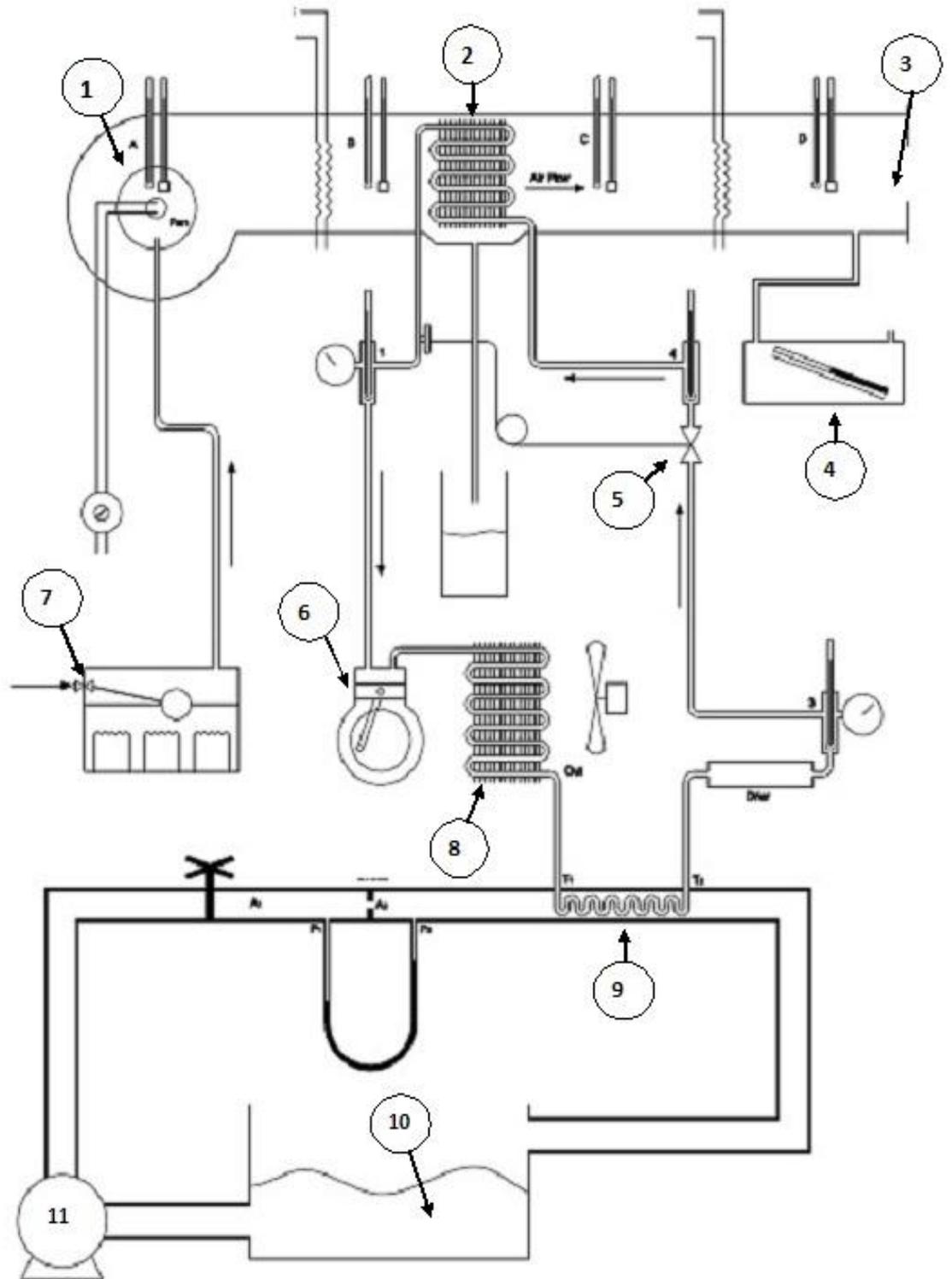
- Temperature Scale : Celcius [°C], Fahrenheit [°F] user-selectble
- Measurement Range : -50°C to 1300°C, -58°F to 2000°F
- Resolution : 1°C or 1°F, 0,1°C or 0,1°F



Gambar 3.9 Digital Thermometer

3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi dari penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.10



Gambar 3.10 Instalasi penelitian

Keterangan :

1. Blower
2. Evaporator
3. Orifice
4. Inclined manometer
5. Katup ekspansi
6. Kompresor
7. Boiler
8. Kondensor
9. *Subcooler*
10. Bak penampung air
11. Pompa

Instalasi penelitian tersebut bekerja sebagai berikut :

a. Siklus refrigerasi

Pada siklus refrigerasi, refrigeran bersirkulasi ke empat komponen utama mesin pendingin yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Kompresor mengkompresi refrigeran menuju kondensor untuk membuang kalor refrigeran, setelah dari kondensor ke katup ekspansi. Sebelum katup ekspansi terdapat alat ukur tekanan dan temperatur yang diberi simbol P_3 dan T_3 . Pada saluran keluar katup ekspansi, terdapat alat ukur temperatur T_4 , refrigeran menuju evaporator untuk menyerap kalor dari beban pendinginan. Setelah dari evaporator menuju ke kompresor, sebelumnya terdapat alat ukur tekanan dan temperatur yang diberi simbol P_1 dan T_1 .

b. Siklus pengondisian udara

Pada siklus pengondisian udara, *blower* menghembuskan udara lingkungan dan uap air dari boiler ke sepanjang *air flow duct*. Pada *air flow duct* dibagi empat bagian yang mana di masing - masing bagian tersebut terdapat alat ukur termometer bola kering dan termometer bola basah.

c. Siklus *subcooling*

Pada siklus *subcooling* air dialirkan pompa dari bak penampung air melewati katup kemudian *orifice* untuk mengetahui perbedaan tekanan, sehingga diketahui laju alir massa air yang akan melewati *subcooler*. Pada *subcooler* terdapat termometer sebelum masuk dan

keluar *subcooler* yang berfungsi untuk mengetahui perubahan temperatur refrigeran keluar kondensor.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur pelaksanaan dibagi menjadi 4 tahap untuk mendapatkan data yang akurat dan logis. Adapun tahapannya sebagai berikut :

1. Persiapan

Melakukan pengecekan kondisi alat ukur yang akan digunakan. Mengambil data kondisi lingkungan seperti kelembaban udara dan tekanan atmosfer.

2. Menjalankan instalasi

- a. Saklar induk dipasang pada posisi (I) dengan *regavolt* pada posisi 0%.
- b. *Blower* diatur supaya ada aliran udara melalui evaporator dengan tujuan membebani dengan mengatur posisi *blower* sesuai variasi data.
- c. Saklar kompresor dinyalakan sehingga instalasi berjalan dan terjadi siklus refrigeran. Instalasi dibiarkan beroperasi sampai terbentuk air pada evaporator yang ditampung dalam gelas ukur.
- d. Atur pembebanan *air flow duct* dengan menggunakan saklar dari semua komponen pelengkap (*boiler, preheater dan regavolt*). Posisinya disesuaikan dengan kombinasi dari variasi data yang ditentukan.
- e. Pompa *subcooling* dijalankan sehingga sirkulasi dari air pada instalasi *subcooling* mengalir untuk mendinginkan aliran refrigerant yang keluar kondensor.

3. Pengambilan Data

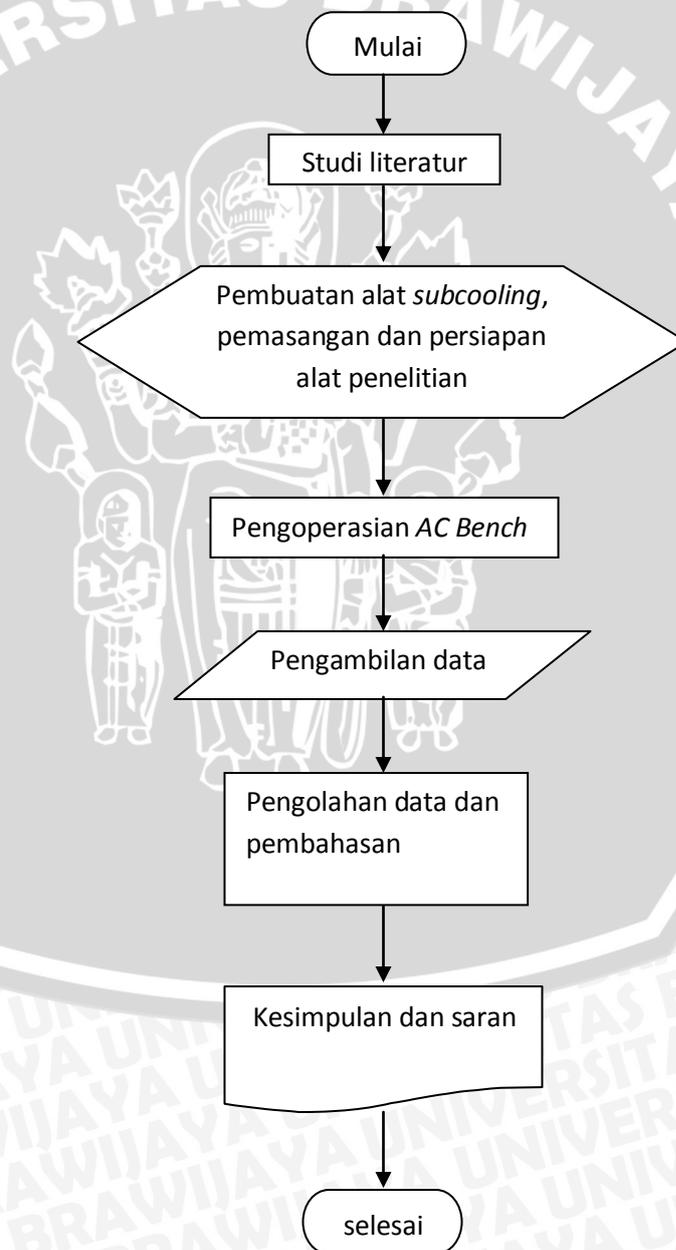
Mencatat nilai dari termometer T_1 (temperatur keluar evaporator), tekanan manometer (P_d) pada *orifice*, debit kondensasi yang terbentuk di gelas penampung air kondensat serta $T_{1sub}:T_{2sub}$. Ini dilaksanakan pada laju alir massa udara yang divariasikan: 0.0654 [kg/s]; 0.0758 [kg/s]; 0.0851 [kg/s]; 0.0949 [kg/s]; 0.103 [kg/s] dengan menggunakan refrigeran Musicool 22 dengan tingkat

subcooling 6 °C. Ulangi langkah 1 sampai dengan 3 pada refrigeran dengan tingkat *subcooling* 7 °C dan 8 °C.

4. Menghentikan Operasi Instalasi

- Semua saklar dari komponen pelengkap dimatikan.
- Kemudian matikan Kompresor.
- Regavolt diturunkan posisinya secara steady hingga 0%
- Matikan saklar induk.

3.6 Diagram Alir Penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

4.1.1 Data Hasil Penelitian

Data - data diambil dengan melakukan variasi laju alir massa udara [kg/s] dan tingkat *subcooling* [°C]. Adapun besarnya yaitu : 0.0654; 0.075; 0.085; 0.094; 0.103 [kg/s] dan 6; 7 dan 8 [°C]. Untuk masing-masing variasi dilakukan percobaan sebanyak 2 kali. Data penelitian yang diperoleh sebagai berikut :

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian

Temperatur Subcooling (°C)	\dot{m} (kg/s)	T _{DB} (°C)	T _{WB} (°C)	T _{DC} (°C)	T _{WC} (°C)	T _{DD} (°C)	T _{WD} (°C)	P ₁ (kN/m ²)	T ₁ (°C)	T ₄ (°C)	P ₃ (kN/m ²)	P _D (mmH ₂ O)	T _{sub} (°C)
6	0.0654	31	25.5	20	19	19	18.5	500	20	6	1300	1.4	31.5
	0.0758	30.5	26	20.75	20.25	20	19.5	500	20	6	1300	1.9	31.25
	0.0851	30	26	21	20.5	20.25	19.75	500	20.5	6	1300	2.4	31
	0.0949	30.25	26	22	21.5	21.25	20.75	500	20.5	6.25	1300	3	31
	0.103	30.75	26	22	21.5	21.5	20.75	500	20.5	6	1300	3.6	31

Temperatur Subcooling (°C)	\dot{m} (kg/s)	T _{DB} (°C)	T _{WB} (°C)	T _{DC} (°C)	T _{WC} (°C)	T _{DD} (°C)	T _{WD} (°C)	P ₁ (kN/m ²)	T ₁ (°C)	T ₄ (°C)	P ₃ (kN/m ²)	P _D (mmH ₂ O)	T _{sub} (°C)
7	0.0654	30	26	20.25	19.25	19.25	18.75	500	18.75	5	1300	1.4	30.75
	0.0758	30.5	25.75	20	19	19.25	18.75	500	19	5	1300	1.9	30.5
	0.0851	30	25.75	19.75	19.25	19.25	18.75	500	19	5	1300	2.4	30.25
	0.0949	30	25.25	20	19.5	20	19	500	19.5	5	1300	3	30.25
	0.103	30	25.25	20	19.5	20	19	500	19.75	5	1300	3.6	30.5

Temperatur Subcooling (°C)	\dot{m} (kg/s)	T _{DB} (°C)	T _{WB} (°C)	T _{DC} (°C)	T _{WC} (°C)	T _{DD} (°C)	T _{WD} (°C)	P ₁ (kN/m ²)	T ₁ (°C)	T ₄ (°C)	P ₃ (kN/m ²)	P _D (mmH ₂ O)	T _{sub} (°C)
8	0.0654	31	26	19.25	18	17.5	16.75	500	18	5	1300	1.4	29
	0.0758	30.5	25.75	19.25	18.25	18.75	18.25	500	18	6	1300	1.9	29
	0.0851	31	26	20.25	19	20	19	500	19	6	1300	2.4	29
	0.0949	30.5	26	21	20	20.75	19.75	500	19.25	6	1300	3.0	29
	0.103	30.5	26	21.5	20	21	20	500	19.25	6.25	1300	3.6	28.75

Dimana :

T_{DB} = temperatur udara kering masuk evaporator (°C)

T_{WB} = temperatur udara basah masuk evaporator (°C)

T_{DC} = temperatur udara kering keluar evaporator (°C)

T_{WC} = temperatur udara basah keluar evaporator (°C)

T₁ = temperatur refrigeran keluar evaporator (°C)

T_4 = temperatur refrigeran masuk evaporator ($^{\circ}\text{C}$)

P_1 = tekanan refrigeran keluar evaporator (kN/m^2)

P_3 = tekanan refrigeran keluar jompresor (kN/m^2)

4.2 Perhitungan Data

Perhitungan data dilakukan untuk mencari nilai besaran-besaran yang diperlukan untuk menentukan unjuk kerja dari mesin pendingin. Berikut adalah contoh perhitungan data dari hasil eksperimen dengan laju alir massa udara 0.0654 [kg/s] dan variasi tingkat *subcooling* 6 $^{\circ}\text{C}$.

- Temperatur udara kering keluar preheater, $T_{\text{DB}} = 31$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatur udara basah keluar preheater, $T_{\text{WB}} = 25.5$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatur udara kering keluar evaporator, $T_{\text{DC}} = 20$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatur udara basah keluar evaporator, $T_{\text{WC}} = 19$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatur refrigeran masuk evaporator, $T_4 = 6$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Temperatur refrigeran keluar evaporator, $T_1 = 20$ [$^{\circ}\text{C}$]
- Tekanan refrigeran setelah dari evaporator, $P_1 = 500$ [kN/m^2]
- Tekanan refrigeran setelah dari kondensor, $P_2 = 1300$ [kN/m^2]

Proses perhitungan :

- Tekanan udara atmosfer (P_0)

$$\begin{aligned} P_0 &= 705 \text{ mmHg} \\ &= \frac{705}{760} \times 101.325 \\ &= 93.9 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

- Tekanan refrigeran keluar evaporator ($P_1 = P_4$)

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1 + P_0 \\ &= 500 + 93.9 \\ &= 593.9 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

- Tekanan refrigeran keluar kondensor ($P_3 = P_2$)

$$\begin{aligned} P_3 &= P_3 + P_0 \\ &= 1300 + 93.9 \\ &= 1393.9 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

1. Mencari entalpi udara pada penampang *duct*.

Melalui diagram psikrometri, dari data temperatur bola kering dan temperatur bola basah pada penampang A, B dan C maka kita dapat mengetahui entalpi udara pada setiap penampangnya, yaitu :

$$T_{DB} = 31^{\circ}\text{C} ; T_{WB} = 25.5^{\circ}\text{C} ; h_B = 79 \text{ [kJ/kg]}$$

$$T_{DC} = 20^{\circ}\text{C} ; T_{WC} = 19^{\circ}\text{C} ; h_C = 54 \text{ [kJ/kg]}$$

$$T_{DD} = 19^{\circ}\text{C} ; T_{WD} = 18.5^{\circ}\text{C} ; h_D = 52.5 \text{ [kJ/kg]}$$

2. Mencari entalpi refrigeran pada temperatur keluar evaporator dan temperatur masuk evaporator.

Melalui diagram moiller p-h R-290 dicari entalpi refrigeran pada temperatur keluar evaporator dan temperatur masuk evaporator sehingga didapat :

$$h_1 = \text{entalpi refrigeran keluar evaporator} = 599 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_2 = \text{entalpi refrigeran keluar kompresor} = 650 \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_3 = \text{entalpi refrigeran masuk evaporator} = 289 \text{ [kJ/kg]}$$

3. Perhitungan efek refrigerasi

Efek refrigerasi adalah banyaknya kalor yang diserap oleh evaporator setiap satuan massa refrigeran untuk menghasilkan efek pendinginan.

$$q_1 = h_1 - h_4 \quad \text{[kJ/kg]}$$

dimana :

$$h_1 = \text{entalpi refrigeran keluar evaporator [kJ/kg]}$$

$$h_4 = \text{entalpi refrigeran masuk evaporator [kJ/kg]}$$

sehingga :

$$\begin{aligned} q_1 &= h_1 - h_4 \\ &= 599 \text{ [kJ/kg]} - 289 \text{ [kJ/kg]} \\ &= 310 \text{ [kJ/kg]} \end{aligned}$$

4. Perhitungan kerja kompresi

Kerja kompresi adalah banyaknya kalor yang dikompresikan kompresor setiap satuan massa refrigeran [kJ/kg].

- Kompresi teoritis

$$w = h_2 - h_1 \text{ [kJ/kg]}$$

dimana :

h_1 = entalpi refrigeran masuk kompresor [kJ/kg]

h_2 = entalpi refrigeran keluar kompresor [kJ/kg]

sehingga :

$$\begin{aligned} w &= h_2 - h_1 \\ &= 650 \text{ [kJ/kg]} - 599 \text{ [kJ/kg]} \\ &= 51 \text{ [kJ/kg]} \end{aligned}$$

- Kompresi aktual

$$W_{\text{akt}} = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right] \text{ [kJ/kg]}$$

Dimana :

T_1 = temperatur refrigeran masuk kompresor [°C]

P_2 = tekanan refrigeran keluar kompresor [kPa]

P_1 = tekanan refrigeran masuk kompresor [kPa]

R = konstanta gas universal [kJ/kmol.K]

Sehingga :

$$\begin{aligned} W_{\text{akt}} &= \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right] \text{ [kJ/kg]} \\ &= \frac{1,33}{1,33-1} \cdot 0,1884 \cdot 293 \cdot \left[\left(\frac{1393,9}{593,9} \right)^{1,33-1/1,33} - 1 \right] \\ &= 221,321 \cdot (1,2357 - 1) \\ &= 52,442 \text{ [kJ/kg]} \end{aligned}$$

5. Perhitungan laju alir massa udara yang melewati *duct*.

Laju alir massa udara yang melewati orifice (\dot{m}_0)

$$\dot{m}_0 = 0,0504 \sqrt{\frac{z}{V_D}}$$

dimana : $P_D = z$

P_D = tekanan orifice pada penampang D [mmH₂O]

V_D = volume spesifik pada penampang D [m³/kg]

V_D didapat dari diagram psikrometri menggunakan data T_{WD} dan T_{DD} .

$$P_D = z = 1,4 \text{ mmH}_2\text{O} ; V_D = 0,845 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_0 &= 0.0504 \sqrt{\frac{z}{v_D}} \\ &= 0.0504 \sqrt{\frac{1.4}{0.845}} \\ &= 0.0648 \text{ [kg/s]}\end{aligned}$$

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_C = \dot{m}_D$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_B &= \dot{m}_C + \dot{m}_{\text{con}} \\ &= \dot{m}_C + \rho \cdot Q_{\text{con}} \\ &= 0.0648 \text{ [kg/s]} + 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot 5.66 \times 10^{-7} \text{ [m}^3\text{/s]} \\ &= 0.06544 \text{ [kg/s]}\end{aligned}$$

6. Perhitungan laju alir massa refrigeran

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{ref}} &= \frac{P_{\text{com}}}{w_{\text{akt}}} \\ &= \frac{1.2}{52.442} \\ &= 0.0228 \text{ [kg/s]}\end{aligned}$$

7. Perhitungan kapasitas pendinginan (Q_{ref})

Perhitungan kapasitas pendinginan digunakan untuk menghitung koefisien prestasi aktual.

$$\begin{aligned}Q_{\text{ref}} &= \dot{m}_B \cdot h_B - \dot{m}_C \cdot h_C - \dot{m}_{\text{con}} \cdot h_{\text{con}} \\ &= 0,0653 \text{ [kg/s]} \cdot 79 \text{ [kJ/kg]} - 0,0648 \text{ [kg/s]} \cdot 54 \text{ [kJ/kg]} - 0,000566 \\ &\quad \text{[kg/s]} \cdot 88,045 \text{ [kJ/kg]} \\ &= 1,61671 \text{ [kJ/s]}\end{aligned}$$

- Efek refrigerasi aktual

$$\begin{aligned}q_{\text{lakt}} &= \frac{Q_{\text{ref}}}{\dot{m}_{\text{ref}}} \\ &= \frac{1,61671}{0.0228} \\ &= 70.652 \text{ [kJ/kg]}\end{aligned}$$

8. Perhitungan koefisien prestasi

- Teoritis

$$\text{COP} = \frac{\text{efek refrigerasi}}{\text{kerja kompresi}}$$

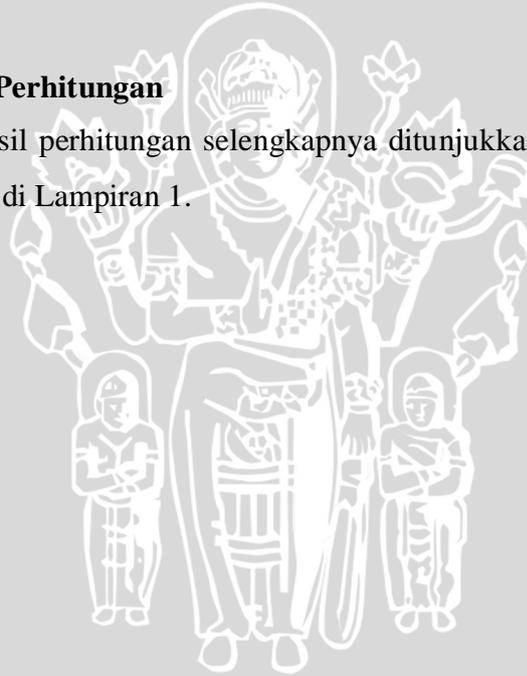
$$\begin{aligned} &= \frac{(h1-h4)}{(h2-h1)} \\ &= \frac{310}{51} \\ &= 6.07843 \end{aligned}$$

- Aktual

$$\begin{aligned} \text{COP} &= \frac{\text{efek refrigerasi}}{\text{kerja kompresi}} \\ &= \frac{q_{akt}}{w_{akt}} \\ &= \frac{70.625}{52.442} \\ &= 1.347 \end{aligned}$$

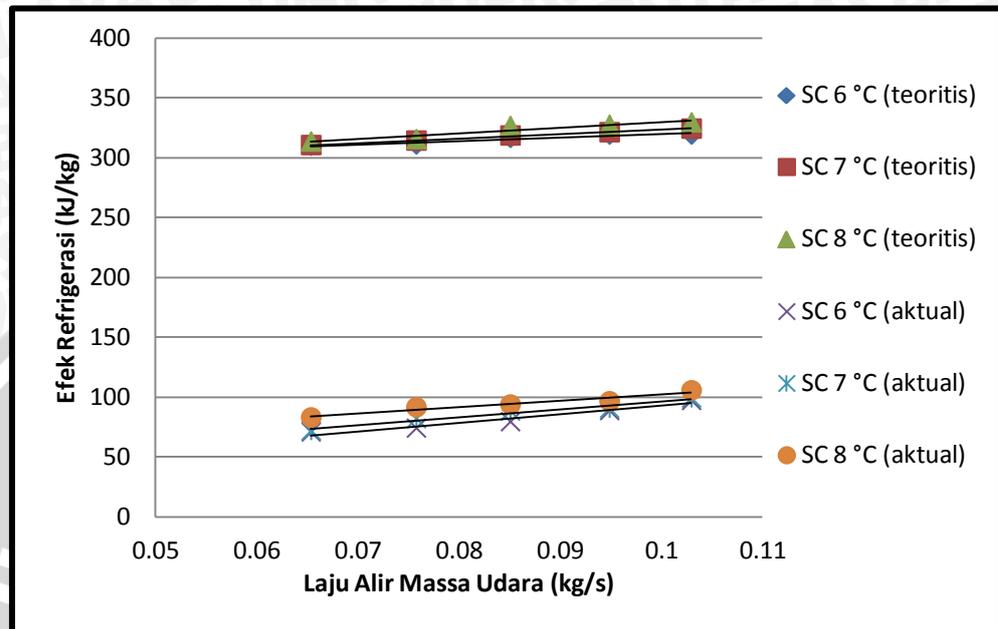
4.3 Data Hasil Perhitungan

Data hasil perhitungan selengkapnya ditunjukkan pada Tabel Data Hasil Perhitungan di Lampiran 1.



4.4 Pembahasan

4.4.1 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Efek Refrigerasi

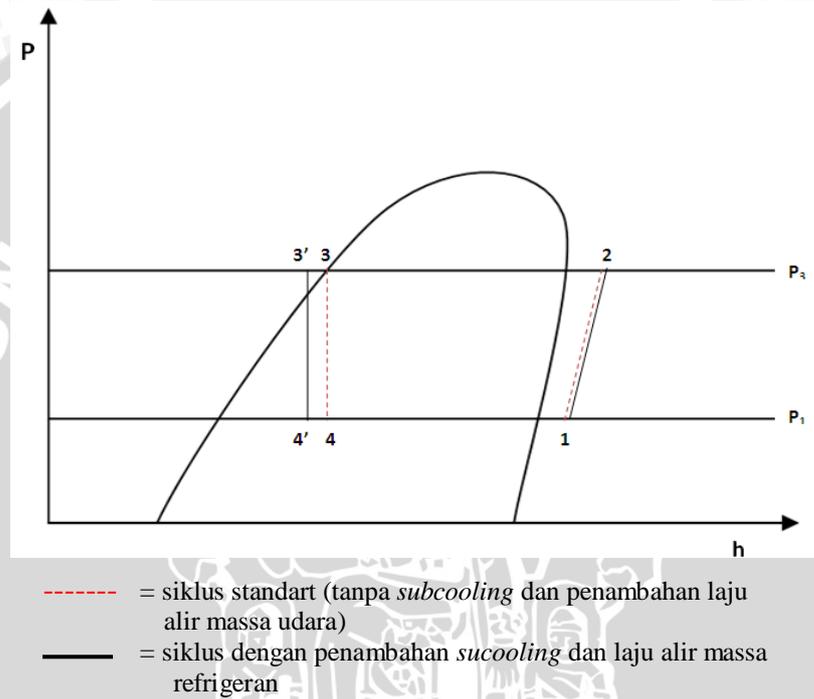


Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Efek Refrigerasi

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara laju aliran massa udara terhadap efek refrigerasi pada instalasi mesin pendingin dengan variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6 °C, 7 °C dan 8 °C.

Grafik tersebut menunjukkan dari laju alir massa udara 0.0654 [kg/s] sampai 0.103 [kg/s] efek refrigerasi cenderung mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi laju aliran massa udara, maka beban pendinginan akan meningkat sehingga kalor yang diserap oleh evaporator semakin tinggi yang mengakibatkan temperatur keluar evaporator dan entalpi keluar evaporator meningkat. Akibat dari peningkatan entalpi keluar evaporator maka efek refrigerasi yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya laju aliran massa udara. Sedangkan pada variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6 °C, 7 °C dan 8 °C efek refrigerasi juga cenderung mengalami peningkatan, hal tersebut dikarenakan dengan penambahan alat *subcooling* setelah kondensor maka temperatur refrigeran keluar kondensor akan semakin turun dan mengakibatkan nilai entalpi keluar

kondensor juga ikut turun, sedangkan pada tingkat *subcooling* yang lebih tinggi 8 °C temperatur keluar kondensor akan semakin rendah dari pada tingkat *subcooling* 6 °C yang mengakibatkan entalpi keluar kondensor pada *subcooling* 8 °C lebih rendah dari pada *subcooling* 6 °C sehingga efek refrigerasi yang dihasilkan juga semakin meningkat seiring dengan kenaikan tingkat *subcooling*, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2 dibawah ini.

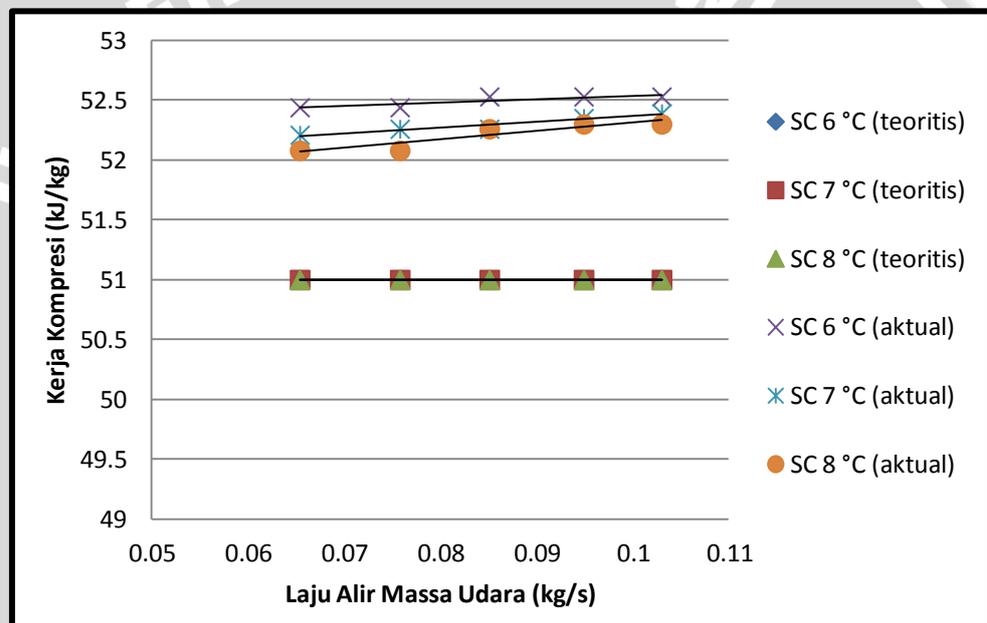


Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Siklus Standart Dan Siklus Dengan *Subcooling*

Dari gambar di atas dapat kita lihat bahwa dengan penambahan *subcooling*, titik 3 dan 4 mengalami pergeseran menjadi 3' dan 4' yang mengakibatkan nilai dari entalpi masuk evaporator (h_4) akan turun menjadi entalpi masuk evaporator setelah proses *subcooling* ($h_{4'}$), sedangkan pada penambahan laju alir massa udara juga terjadi pergeseran pada titik 1 akibat dari kenaikan temperatur keluar evaporator yang menyebabkan nilai dari entalpi keluar evaporator juga meningkat sehingga efek refrigerasi cenderung mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan laju alir massa udara dan penurunan suhu keluar kondensor.

Perbedaan yang signifikan antara efek refrigerasi aktual dan teoritis pada grafik 4.1 diatas disebabkan karena parameter yang digunakan berbeda. Pada efek refrigerasi aktual, parameter yang digunakan lebih mengarah pada sistem pengondisi udara dimana entalpi udara melewati *air flow duct* yang lebih diperhitungkan. Sedangkan pada efek refrigerasi teoritis lebih ke arah sistem dari mesin pendingin, yang mengacu pada diagram moiller p-h R-290 untuk mendapatkan selisih entalpi refrigeran masuk evaporator dan keluar evaporator.

4.4.2 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Kerja Kompresi

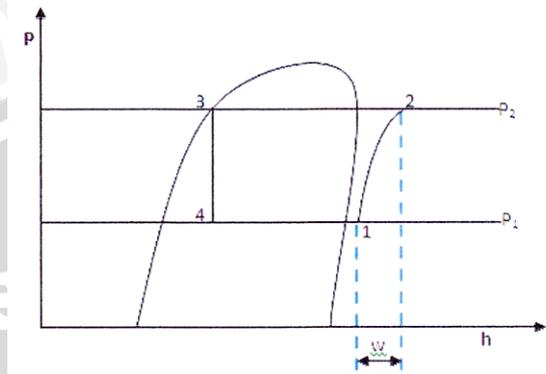


Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Kerja Kompresi

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara laju alir massa udara terhadap kerja kompresi pada instalasi mesin pendingin dengan variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6°C, 7°C dan 8°C.

Grafik tersebut menunjukkan dari laju alir massa udara 0.0654 [kg/s] sampai 0.103 [kg/s] kerja kompresi cenderung konstan, begitu juga pada variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6 °C, 7 °C dan 8 °C, kerja kompresi yang dihasilkan cenderung konstan, hal tersebut dikarenakan tekanan refrigeran masuk kompresor dan tekanan refrigeran keluar kompresor tidak terjadi perubahan, dalam hal ini tekanan refrigeran

keluar dan masuk kompresor konstan sehingga selisih nilai antara entalpi masuk kompresor dengan entalpi keluar kompresor sama, dengan nilai kerja kompresi 51 [kJ/kg]. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.4 di bawah ini.

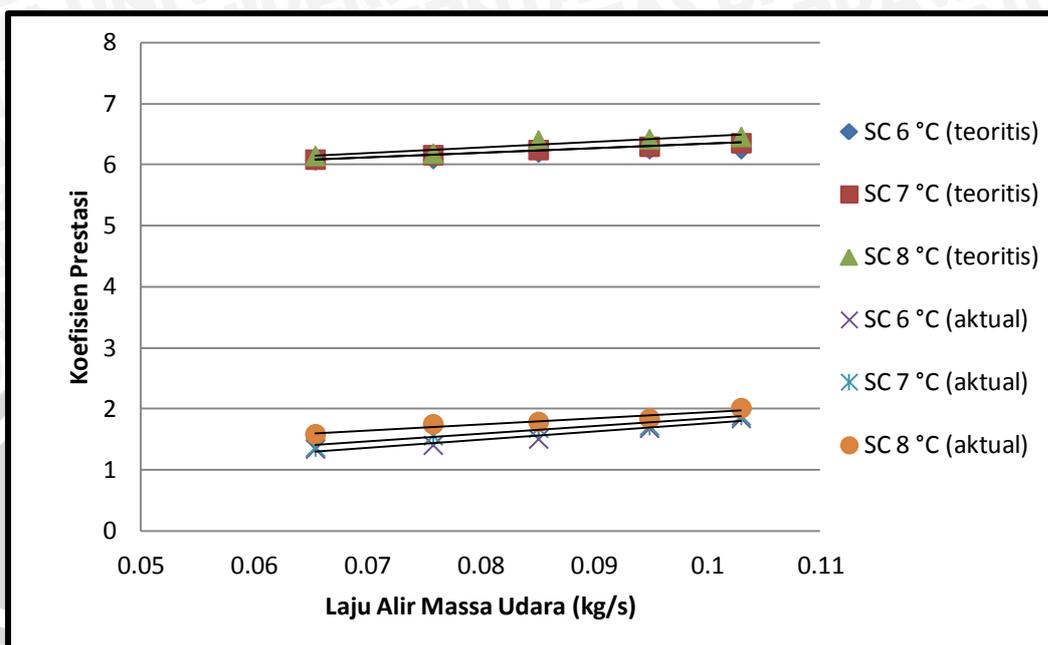


Gambar 4.4 Grafik perbandingan kerja kompresi

Sedangkan pada kerja kompresi aktual nilainya mengalami peningkatan pada laju alir massa udara yang berbeda dan mengalami penurunan pada tingkat *subcooling* yang berbeda tetapi selisihnya sangat kecil sekali antara 52 [kJ/kg] sampai 52,5 [kJ/kg] sehingga dapat diasumsikan pada kerja kompresi aktual cenderung konstan seperti pada kerja kompresi teoritis.

Pada kerja kompresi tidak terjadi perbedaan yang signifikan antara kerja kompresi teoritis dan aktual, meskipun terdapat perbedaan nilainya tidak terlalu tinggi, hanya 1 [kJ/kg]. Hal ini disebabkan karena parameter yang digunakan sama, yaitu sistem dari mesin pendingin sehingga nilainya hampir sama.

4.4.3 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Koefisien Prestasi

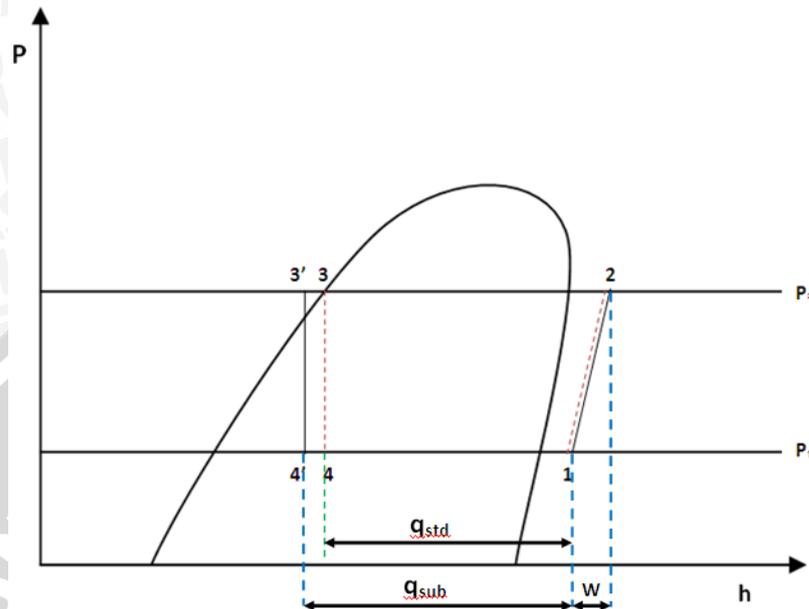


Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Laju Alir Massa Udara Terhadap Koefisien Prestasi

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara laju alir massa udara terhadap koefisien prestasi pada instalasi mesin pendingin dengan variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6°C, 7°C dan 8°C.

Grafik tersebut menunjukkan dari laju alir massa udara 0.0654 [kg/s] sampai 0.103 [kg/s] koefisien prestasi cenderung mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi laju aliran massa udara, maka beban pendinginan akan meningkat sehingga kalor yang diserap oleh evaporator semakin tinggi yang mengakibatkan temperatur keluar evaporator dan entalpi keluar evaporator meningkat. Akibat dari peningkatan entalpi keluar evaporator maka efek refrigerasi yang dihasilkan akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya laju aliran massa udara, sedangkan pada variasi tingkat *subcooling* mulai dari 6 °C, 7 °C dan 8 °C efek refrigerasi juga cenderung mengalami peningkatan. Akibat dari peningkatan efek refrigersi dengan kerja kompresi yang konstan menyebabkan nilai dari koefisien prestasi meningkat dari yang tingkat *subcooling* 6°C sampai nilai koefisien tertinggi pada tingkat

subcooling 8°C, pengaruh dari efek refrigerasi dan kerja kompresi terhadap koefisien prestasi dapat kita lihat pada gambar 4.6 di bawah ini.



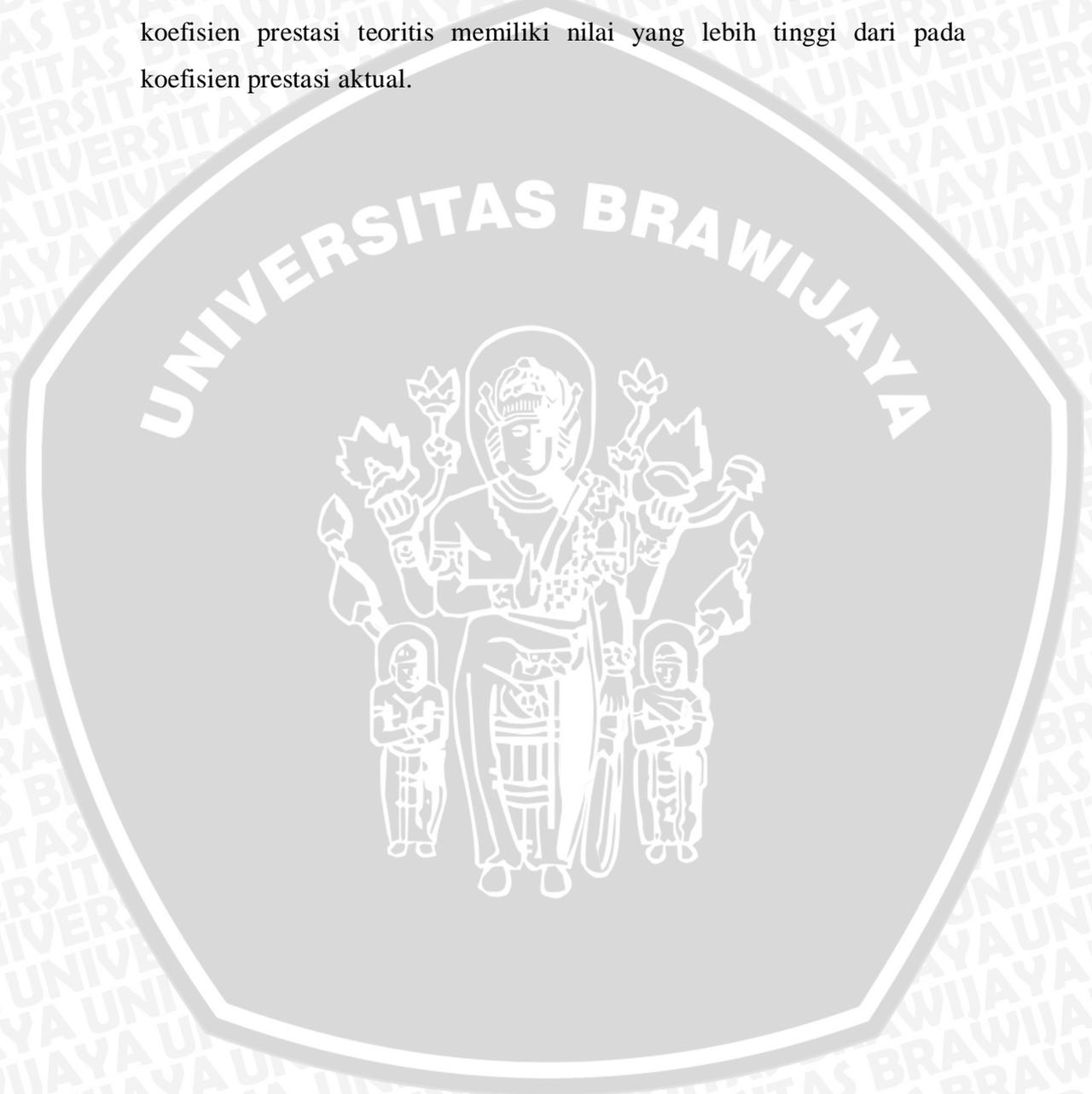
- = siklus standar (tanpa *subcooling* dan penambahan laju alir massa udara)
- = siklus dengan penambahan *subcooling* dan laju alir massa refrigeran

Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Siklus Standar Dan Siklus Dengan *Subcooling*

Dari gambar di atas dapat kita lihat bahwa dengan penambahan *subcooling* setelah kondensor maka akan menurunkan temperatur keluar kondensor sehingga entalpi keluar kondensor ikut turun yang menyebabkan nilai efek refrigerasi akan meningkat dibandingkan dengan tanpa menggunakan *subcooling*. Untuk tingkat *subcooling* 6°C, pada laju alir massa 0.0654 [kg/s] koefisien prestasi pada kondisi teoritis memiliki nilai sebesar 6.078 sedangkan pada kondisi aktual koefisien prestasinya 1.347. Koefisien prestasi cenderung mengalami peningkatan sampai pada laju alir massa 0.103 [kg/s] dengan nilai koefisien prestasi teoritis sebesar 6.259 sedangkan pada koefisien prestasi aktual sebesar 1.846.

Perbedaan koefisien prestasi pada kondisi aktual dan teoritis dipengaruhi oleh efek refrigerasi, dimana pada efek refrigerasi teoritis memiliki kecenderungan lebih tinggi dari pada efek refrigerasi aktual, hal

ini disebabkan karena pada kondisi aktual laju alir massa refrigeran diperhitungkan untuk mendapatkan nilai efek refrigerasi aktual sedangkan pada teoritis hanya memperhitungkan selisih entalpi refrigeran. Disamping dipengaruhi oleh efek refrigerasi, koefisien prestasi juga dipengaruhi oleh kerja kompresi, dimana nilai dari kerja kompresi hampir sama maka koefisien prestasi teoritis memiliki nilai yang lebih tinggi dari pada koefisien prestasi aktual.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil dari penelitian pengaruh penambahan *subcooling* terhadap unjuk kerja mesin pendingin dengan refrigeran *musicool* (MC-22) dapat disimpulkan. efek refrigerasi cenderung mengalami peningkatan dengan bertambahnya laju aliran massa udara dan perubahan tingkat *subcooling* dari 6°C, 7°C sampai 8°C. Sedangkan kerja kompresi cenderung konstan dengan bertambahnya laju aliran massa udara dan perubahan tingkat *subcooling*, sehingga koefisien prestasi yang dihasilkan akan semakin meningkat akibat dari peningkatan efek refrigerasi dengan kerja kompresi yang konstan. Pada penggunaan refrigeran *musicool* (MC-22) menunjukkan penggunaan yang lebih irit dari pada refrigeran halokarbon dan unjuk kerja dari instalasi mesin pendingin mengalami peningkatan.

5.2 Saran

- Untuk penelitian variasi *subcooling* selanjutnya disarankan menggunakan instalasi *subcooler* yang lebih praktis dan akurat.

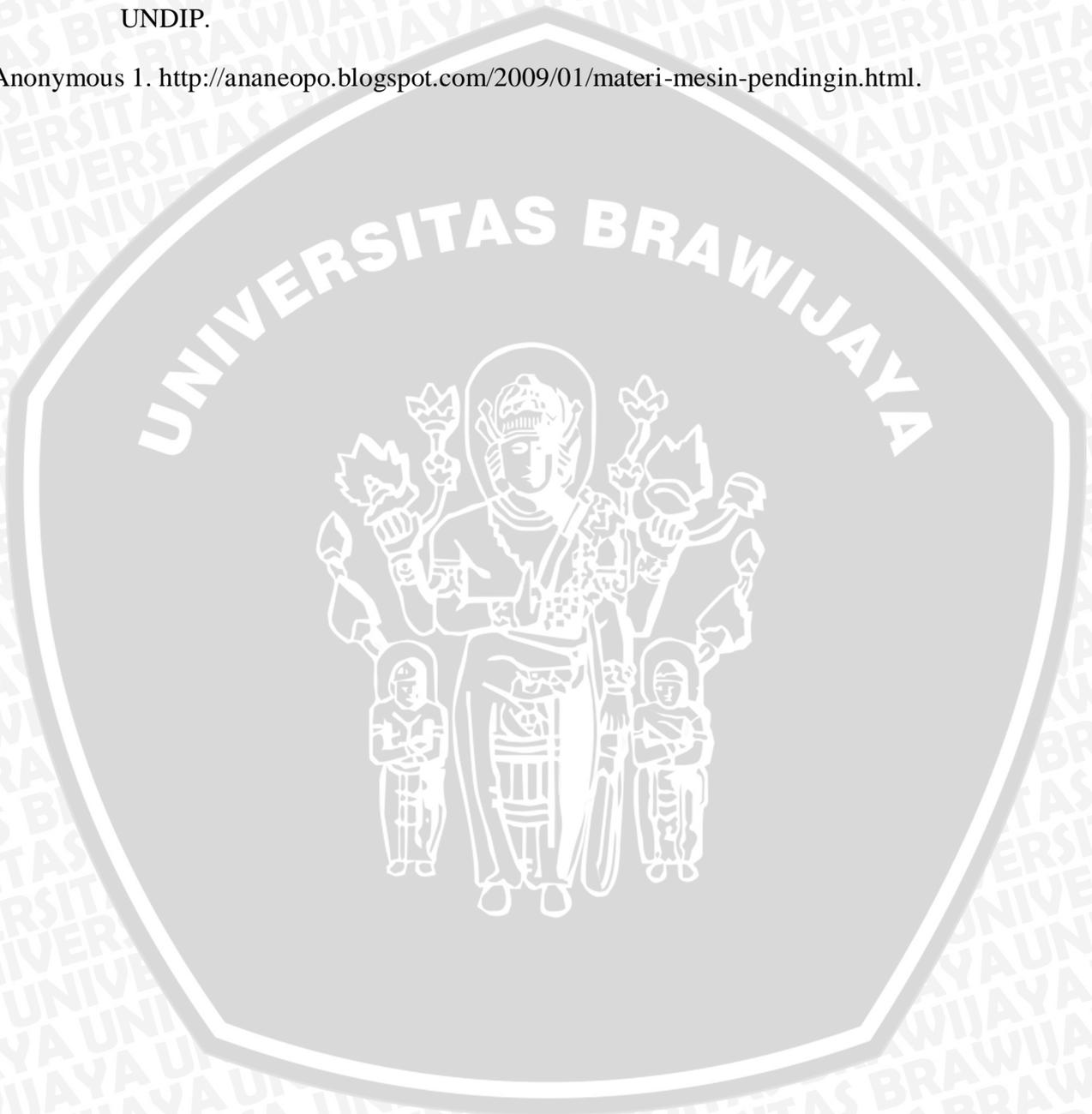
DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, W. & Heizo Sato. 1980. *Penyegaran Udara*. Jakarta : PT. Pradnya Pramita.
- Basri, M. H. 2009. *Pengaruh Temperatur Kondensor Terhadap Kinerja Mesin Refrigerasi Focus 808*. Jurnal SMARTek. Vol.7 : 62 – 68.
- Bolaji, B.O. 2010. *Effects Of Subcooling On The Performance Of R12 Alternatives In A Domestic Refrigeration System*. Nigeria : Department of Mechanical Engineering University of Agriculture.
- Depatemen Teknik Kimia. 2007. *Makalah Termodinamika Terapan LNG Receiving Terminal*. Depok : Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Dolin, Brian. 2010. *Basic Superheat, Saturation And Subcooling*. KE2 Therm Solution. Washington.
- Effendi, M. 2005. *Pengaruh Kecepatan Udara Pendingin Kondensor Terhadap Koefisien Prestasi Air Conditioning*. Jurnal Teknik Gelagar. Vol.16 : 51- 58.
- Hidayat, M. 1996. *Analisa Data Hasil Ukur Aliran Menggunakan Orifice-Flowmeter*. Tangerang : Puslitbang KIM – LIPI.
- Maulana, A. 2006. *Dasar Teknik Pendingin*. Jakarta : PT. Mitra Lestari Bumi Abadi.
- Nasrudin. *Penelitian Perbandingan Unjuk Kerja Tiga Refrigeran Hidrokarbon Indonesia Terhadap Refrigeran R12 (CFC-12)*. Jurnal Teknologi ISSN 0215-1685. Edisi no.4 : 241 – 251.
- Nugroho, S. *The Refrigerator With Refrigerant Hidrokarbon System Analysis Musicool (MC-134)*. Gunadarma University Library.
- Pasek, A.D. *Aplikasi Refrigerant Hidrokarbon Pada Mesin Refrigerasi Dan Pengkondisian Udara Untuk Penghematan Konsumsi Energy Listrik*. Bandung : Fakultas Teknik Mesin Dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung.
- Pertamina. 2010. *The Future Trend Of Natural Refrigerant In Indonesia*. Jakarta : Pertamina.
- Samuel, V. 2010. *Refrigerasi Absorpsi*. Bandung : Program Studi Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung.
- Septiadi, W.N. 2008. *Studi Eksperimental Orifice Flowmeter Dengan Variasi Tebal Dan Posisi Pengukuran Beda Tekanan Aliran Melintasi Orifice Plate*. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM. Vol.2 :61 – 68.
- Stoecker, W.F & Jerold W. Jones. 1992. *Refrigerasi Dan Pengkondisian Udara*. Edisi II. Terjemahan Supratman Hara. Jakarta : Erlangga.

Sugadiyanto. 2006. *Studi Eksperimental Performa Mesin Pengkondisian Udara (AC) Mc Quay Dengan Refrigerant R-22 Pada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang*. Semarang : Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Syaiful. 2005. *Unjuk Kerja System Air – Cooled Chiller Dengan Evaporator Jenis Spiral Menggunakan Refrigerant HCR-22*. Jurnal Rotasi. Vol.7. Semarang : FT-UNDIP.

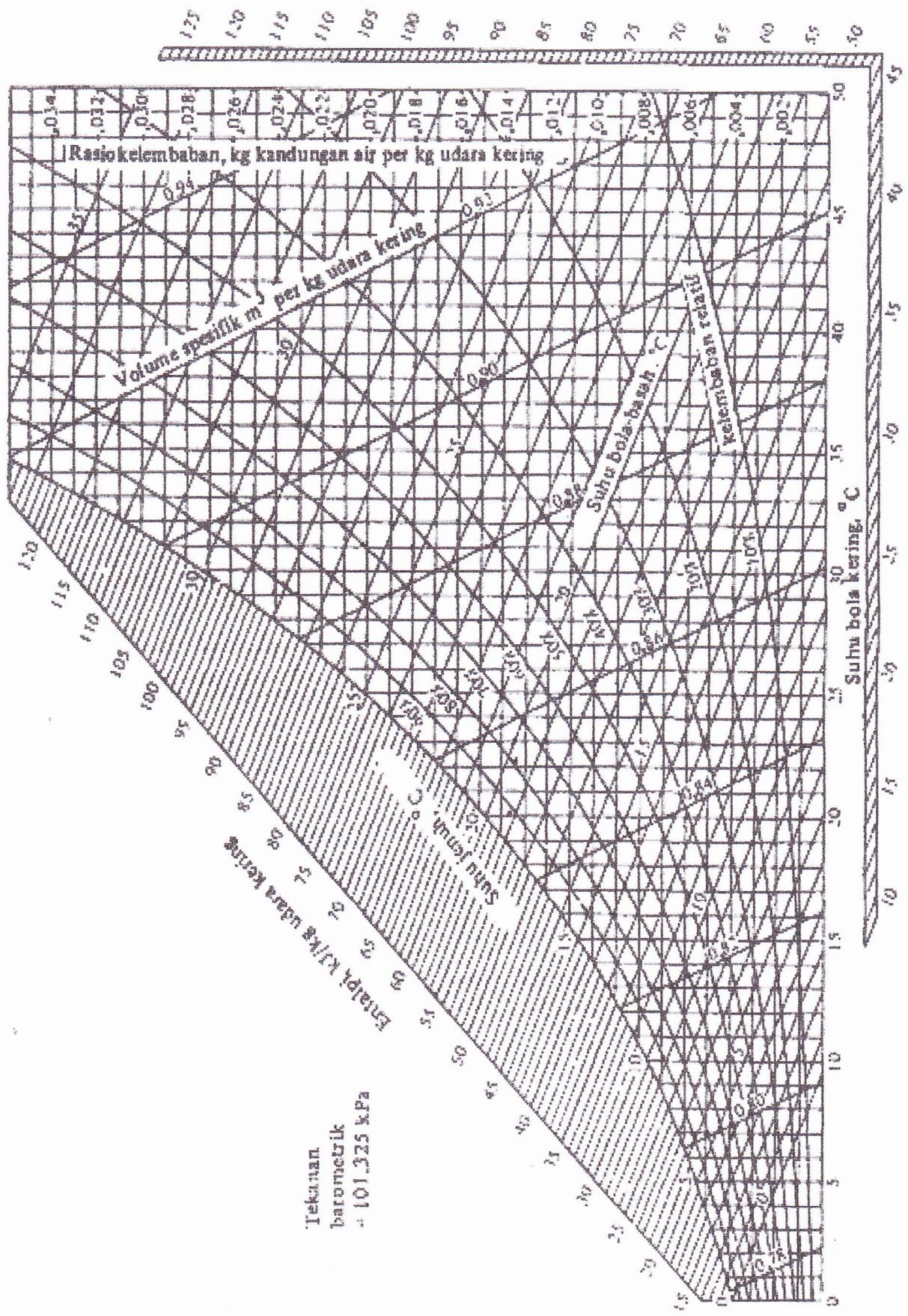
Anonymous 1. <http://ananeopo.blogspot.com/2009/01/materi-mesin-pendingin.html>.





LAMPIRAN

Tempo ratur Subcooling (°C)	Laju alir massa udara (kg/s)	h_1 (kJ/kg)	h_2 (kJ/kg)	h_4 (kJ/kg)	h_B (kJ/kg)	h_C (kJ/kg)	h_{CO} (kJ/kg)	P_d (mm H ₂ O)	V_d (m ³ /kg)	m_{con} (kg/s)	m_o (kg/s)	m_b (kg/s)	m_{ref} (kg/s)	$q_{(ref)}$ (kg/s)	Q_{ref} (kJ/kg)	q_1 aktual (kJ/kg)	W_{ideal} (kJ/s)	$W_{(aktual)}$	KP aktual	KP ideal
8	0.065	578.5	629.5	265	80.5	51	88.0	1.4	0.84	0.0005	0.0648	0.0653	0.004	313	1.9098	386.7	51	52.083	7.42	6.147
	4						45		5	25	7333	9833	938	.5	0215	5615		9921	562	059
	0.075	580.5	631.5	265	80	52	88.0	1.9	0.85	0.0005	0.0753	0.0759	0.004	315	2.1054	426.3	51	52.083	8.18	6.186
	8						45		5	5	5254	0254	938	.5	4626	7626		9921	632	275
	0.085	591.5	642.5	265	80.5	55	92.2	2.4	0.85	0.0005	0.0845	0.0851	0.004	326	2.1507	435.5	51	52.262	8.33	6.401
	1						3		2	3333	8948	2281	938	.5	7576	5599		9749	393	961
	0.094	592.5	643.5	265	80.5	57	92.2	3	0.85	0.0005	0.0944	0.0949	0.004	327	2.2121	447.9	51	52.307	8.56	6.421
	9						3		5	5	0785	5785	938	.5	3297	8151		7206	435	569
	0.103	592.5	643.5	263	80.5	57	92.2	3.6	0.85	0.0005	0.1033	0.1039	0.004	329	2.4224	490.5	51	52.307	9.37	6.460
								3	6	6	5	5819	0819	938	.5	6602	7628		7206	866



Tekanan
 barometrik
 = 101.325 kPa

Entalpi, kJ/kg udara kering

R290 Ref. W.C.Reynolds: Thermodynamic Properties in SI

DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/(kg.K)], v in [m³/kg], T in [°C]
M.J. Skovrup & H.L.H. Knudsen, 10-08-08

PT. TEACH INTEGRATION
Komp. Pertokoan Cipiapuri Blok GG-9 Sekupang Batam
Phone: +62 778 323 768
Fax: +62 778 323 768
E-mail: teach_integration@gmail.com
<http://teachintegration.wordpress.com>

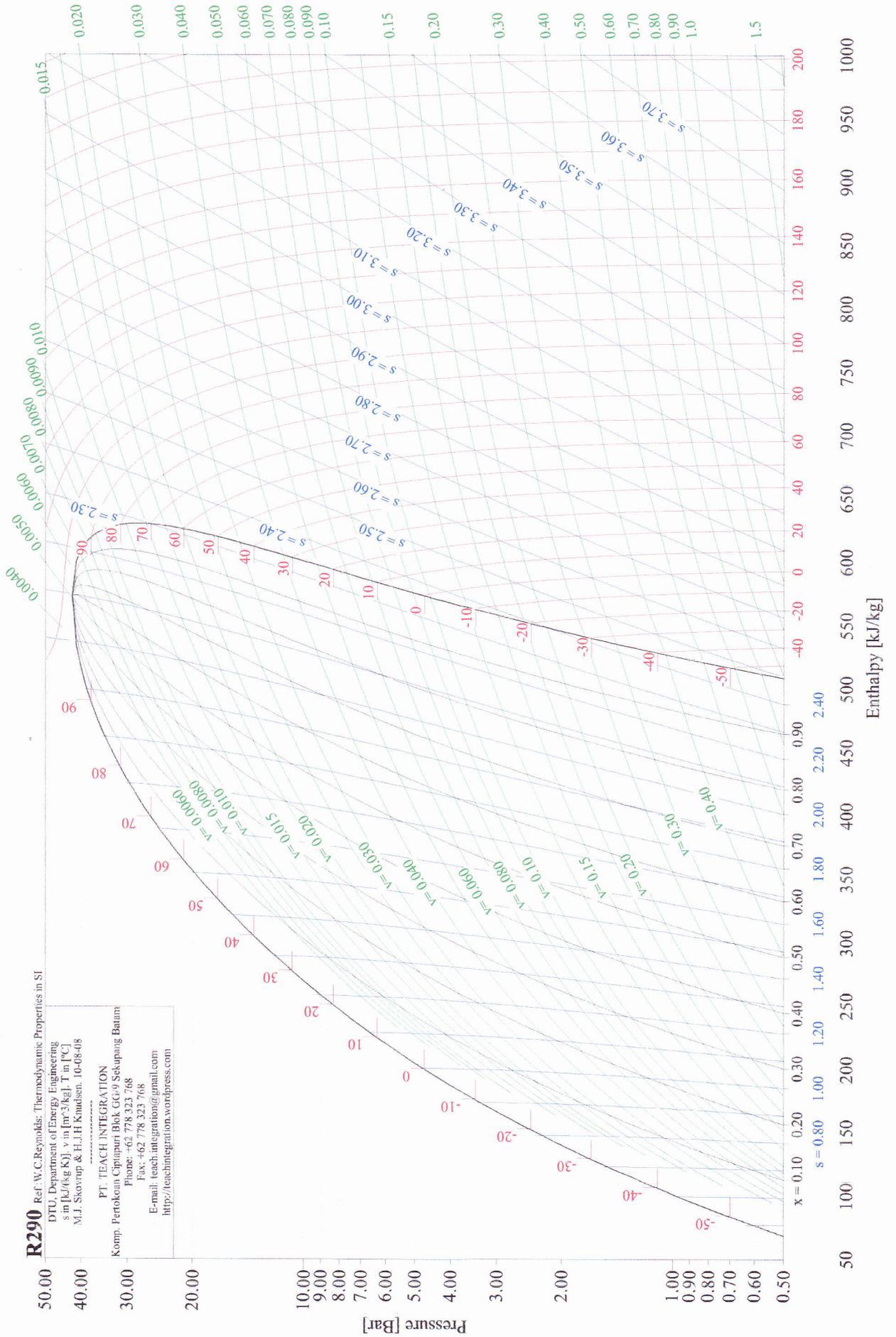


Table of saturated values for: R290, CH3CH2CH3, Propane

T °C	p Bar	v _l dm ³ /kg	v _g m ³ /kg	h _l kJ/kg	h _g kJ/kg	R kJ/kg	s _l kJ/(kg K)	s _g kJ/(kg K)
-56.00	0.520	1.7107	0.76728	70.29	509.50	439.21	0.4726	2.4952
-55.00	0.547	1.7137	0.73211	72.51	510.68	438.17	0.4827	2.4913
-54.00	0.575	1.7167	0.69889	74.73	511.86	437.13	0.4929	2.4875
-53.00	0.604	1.7198	0.66749	76.95	513.04	436.09	0.5030	2.4838
-52.00	0.635	1.7229	0.63780	79.18	514.22	435.04	0.5130	2.4802
-51.00	0.666	1.7259	0.60971	81.41	515.40	433.99	0.5231	2.4767
-50.00	0.699	1.7290	0.58311	83.64	516.57	432.93	0.5331	2.4732
-49.00	0.733	1.7322	0.55792	85.88	517.75	431.87	0.5431	2.4698
-48.00	0.768	1.7353	0.53405	88.13	518.92	430.80	0.5530	2.4664
-47.00	0.805	1.7384	0.51142	90.37	520.10	429.73	0.5630	2.4632
-46.00	0.843	1.7416	0.48996	92.62	521.27	428.65	0.5729	2.4599
-45.00	0.882	1.7448	0.46958	94.88	522.45	427.57	0.5827	2.4568
-44.00	0.923	1.7480	0.45024	97.13	523.62	426.48	0.5926	2.4537
-43.00	0.965	1.7512	0.43187	99.39	524.79	425.39	0.6024	2.4507
-42.00	1.009	1.7545	0.41440	101.66	525.96	424.30	0.6122	2.4478
-41.00	1.054	1.7577	0.39780	103.92	527.12	423.20	0.6219	2.4449
-40.00	1.101	1.7610	0.38201	106.20	528.29	422.10	0.6316	2.4420
-39.00	1.149	1.7643	0.36698	108.47	529.46	420.99	0.6413	2.4393
-38.00	1.199	1.7676	0.35266	110.75	530.62	419.88	0.6510	2.4366
-37.00	1.251	1.7709	0.33903	113.03	531.78	418.76	0.6606	2.4339
-36.00	1.305	1.7743	0.32604	115.31	532.95	417.64	0.6702	2.4313
-35.00	1.360	1.7776	0.31366	117.59	534.10	416.51	0.6798	2.4288
-34.00	1.417	1.7810	0.30185	119.88	535.26	415.38	0.6894	2.4263
-33.00	1.475	1.7844	0.29058	122.17	536.42	414.25	0.6989	2.4238
-32.00	1.536	1.7878	0.27983	124.47	537.58	413.11	0.7084	2.4214
-31.00	1.599	1.7913	0.26956	126.77	538.73	411.96	0.7178	2.4191
-30.00	1.663	1.7948	0.25975	129.07	539.88	410.81	0.7273	2.4168
-29.00	1.730	1.7982	0.25037	131.37	541.03	409.66	0.7367	2.4146
-28.00	1.798	1.8018	0.24141	133.68	542.18	408.50	0.7461	2.4124
-27.00	1.869	1.8053	0.23284	135.99	543.33	407.33	0.7554	2.4102
-26.00	1.942	1.8088	0.22464	138.30	544.47	406.17	0.7647	2.4081
-25.00	2.016	1.8124	0.21679	140.62	545.61	404.99	0.7740	2.4061
-24.00	2.093	1.8160	0.20928	142.94	546.75	403.81	0.7833	2.4041
-23.00	2.173	1.8196	0.20208	145.27	547.89	402.63	0.7926	2.4021
-22.00	2.254	1.8233	0.19518	147.59	549.03	401.43	0.8018	2.4002
-21.00	2.338	1.8270	0.18858	149.93	550.16	400.24	0.8110	2.3983
-20.00	2.424	1.8307	0.18224	152.26	551.30	399.03	0.8202	2.3965
-19.00	2.513	1.8344	0.17616	154.60	552.43	397.83	0.8293	2.3947
-18.00	2.604	1.8381	0.17033	156.94	553.55	396.61	0.8385	2.3929
-17.00	2.697	1.8419	0.16474	159.29	554.68	395.39	0.8476	2.3912
-16.00	2.793	1.8457	0.15936	161.64	555.80	394.16	0.8567	2.3895
-15.00	2.892	1.8495	0.15420	164.00	556.92	392.92	0.8658	2.3878
-14.00	2.993	1.8534	0.14925	166.36	558.04	391.68	0.8748	2.3862
-13.00	3.097	1.8573	0.14448	168.73	559.15	390.43	0.8839	2.3846
-12.00	3.204	1.8612	0.13991	171.10	560.27	389.17	0.8929	2.3831
-11.00	3.313	1.8651	0.13550	173.47	561.38	387.90	0.9019	2.3816
-10.00	3.425	1.8691	0.13127	175.85	562.48	386.63	0.9109	2.3801
-9.00	3.540	1.8731	0.12719	178.24	563.59	385.35	0.9198	2.3787
-8.00	3.658	1.8771	0.12327	180.63	564.69	384.05	0.9288	2.3772
-7.00	3.779	1.8812	0.11950	183.03	565.79	382.75	0.9377	2.3758
-6.00	3.902	1.8853	0.11586	185.44	566.88	381.44	0.9467	2.3745
-5.00	4.029	1.8894	0.11236	187.85	567.97	380.13	0.9556	2.3732
-4.00	4.159	1.8935	0.10899	190.26	569.06	378.80	0.9645	2.3719
-3.00	4.292	1.8977	0.10573	192.69	570.15	377.46	0.9734	2.3706
-2.00	4.428	1.9020	0.10260	195.12	571.23	376.11	0.9823	2.3694
-1.00	4.568	1.9062	0.09957	197.56	572.31	374.75	0.9911	2.3681
0.00	4.710	1.9106	0.09666	200.00	573.38	373.38	1.0000	2.3669
1.00	4.856	1.9149	0.09385	202.45	574.45	372.00	1.0089	2.3658
2.00	5.005	1.9193	0.09113	204.91	575.52	370.61	1.0177	2.3646
3.00	5.158	1.9237	0.08851	207.38	576.58	369.21	1.0265	2.3635

Table of saturated values for: R290, CH₃CH₂CH₃, Propane

T °C	p Bar	v _l dm ³ /kg	v _g m ³ /kg	h _l kJ/kg	h _g kJ/kg	R kJ/kg	s _l kJ/(kg K)	s _g kJ/(kg K)
4.00	5.314	1.9282	0.08598	209.85	577.64	367.79	1.0354	2.3624
5.00	5.474	1.9327	0.08353	212.33	578.70	366.37	1.0442	2.3614
6.00	5.637	1.9372	0.08117	214.82	579.75	364.93	1.0530	2.3603
7.00	5.804	1.9418	0.07889	217.32	580.80	363.48	1.0618	2.3593
8.00	5.974	1.9465	0.07669	219.83	581.84	362.01	1.0707	2.3583
9.00	6.148	1.9511	0.07456	222.30	582.88	360.58	1.0793	2.3573
10.00	6.326	1.9559	0.07250	224.83	583.92	359.09	1.0881	2.3564
11.00	6.508	1.9607	0.07051	227.36	584.95	357.59	1.0969	2.3554
12.00	6.694	1.9655	0.06858	229.90	585.97	356.08	1.1057	2.3545
13.00	6.883	1.9704	0.06671	232.45	586.99	354.55	1.1145	2.3536
14.00	7.076	1.9753	0.06490	235.00	588.01	353.01	1.1233	2.3527
15.00	7.274	1.9803	0.06316	237.57	589.02	351.45	1.1321	2.3518
16.00	7.475	1.9854	0.06146	240.15	590.03	349.88	1.1409	2.3509
17.00	7.681	1.9905	0.05982	242.73	591.03	348.29	1.1497	2.3501
18.00	7.890	1.9956	0.05823	245.33	592.02	346.69	1.1585	2.3492
19.00	8.104	2.0009	0.05669	247.93	593.01	345.08	1.1673	2.3484
20.00	8.322	2.0062	0.05520	250.55	593.99	343.44	1.1760	2.3476
21.00	8.545	2.0115	0.05375	253.17	594.97	341.80	1.1848	2.3468
22.00	8.771	2.0170	0.05235	255.81	595.94	340.14	1.1936	2.3460
23.00	9.003	2.0225	0.05099	258.45	596.91	338.46	1.2024	2.3452
24.00	9.238	2.0280	0.04967	261.10	597.87	336.76	1.2112	2.3445
25.00	9.478	2.0337	0.04839	263.77	598.82	335.05	1.2200	2.3437
26.00	9.723	2.0394	0.04715	266.44	599.76	333.32	1.2287	2.3430
27.00	9.972	2.0452	0.04594	269.12	600.70	331.58	1.2375	2.3422
28.00	10.226	2.0511	0.04477	271.82	601.63	329.82	1.2463	2.3415
29.00	10.485	2.0571	0.04364	274.52	602.56	328.04	1.2551	2.3408
30.00	10.749	2.0631	0.04253	277.23	603.47	326.24	1.2639	2.3401
31.00	11.017	2.0693	0.04146	279.96	604.38	324.43	1.2727	2.3393
32.00	11.290	2.0755	0.04042	282.69	605.28	322.59	1.2815	2.3386
33.00	11.568	2.0819	0.03940	285.44	606.18	320.74	1.2903	2.3379
34.00	11.852	2.0883	0.03842	288.19	607.06	318.87	1.2990	2.3372
35.00	12.140	2.0949	0.03746	290.96	607.94	316.98	1.3078	2.3365
36.00	12.433	2.1016	0.03653	293.74	608.80	315.07	1.3166	2.3358
37.00	12.732	2.1084	0.03563	296.53	609.66	313.13	1.3255	2.3351
38.00	13.036	2.1153	0.03475	299.33	610.51	311.18	1.3343	2.3344
39.00	13.345	2.1223	0.03389	302.14	611.35	309.21	1.3431	2.3336
40.00	13.659	2.1295	0.03305	304.96	612.17	307.21	1.3519	2.3329
41.00	13.979	2.1368	0.03224	307.80	612.99	305.19	1.3607	2.3322
42.00	14.305	2.1442	0.03145	310.65	613.80	303.15	1.3695	2.3315
43.00	14.636	2.1518	0.03068	313.51	614.59	301.08	1.3784	2.3307
44.00	14.973	2.1596	0.02993	316.38	615.37	298.99	1.3872	2.3300
45.00	15.315	2.1675	0.02920	319.27	616.15	296.87	1.3961	2.3292
46.00	15.663	2.1756	0.02849	322.18	616.90	294.73	1.4050	2.3284
47.00	16.017	2.1838	0.02779	325.09	617.65	292.56	1.4139	2.3277
48.00	16.377	2.1923	0.02712	328.02	618.38	290.36	1.4228	2.3269
49.00	16.742	2.2009	0.02646	330.97	619.10	288.13	1.4317	2.3260
50.00	17.114	2.2097	0.02581	333.94	619.80	285.86	1.4406	2.3252
51.00	17.492	2.2188	0.02518	336.92	620.49	283.57	1.4496	2.3244
52.00	17.876	2.2281	0.02457	339.92	621.16	281.24	1.4585	2.3235
53.00	18.266	2.2376	0.02397	342.94	621.81	278.88	1.4675	2.3226
54.00	18.663	2.2474	0.02339	345.97	622.45	276.48	1.4766	2.3217
55.00	19.066	2.2574	0.02282	349.03	623.07	274.04	1.4856	2.3207
56.00	19.475	2.2678	0.02226	352.11	623.67	271.56	1.4947	2.3197
57.00	19.891	2.2784	0.02172	355.22	624.25	269.03	1.5038	2.3187
58.00	20.313	2.2893	0.02118	358.35	624.81	266.47	1.5130	2.3177
59.00	20.743	2.3006	0.02066	361.50	625.35	263.85	1.5222	2.3166
60.00	21.179	2.3122	0.02016	364.68	625.87	261.18	1.5315	2.3155
61.00	21.621	2.3242	0.01966	367.90	626.36	258.47	1.5408	2.3143
62.00	22.071	2.3367	0.01917	371.14	626.83	255.69	1.5502	2.3131
63.00	22.528	2.3495	0.01869	374.41	627.27	252.86	1.5596	2.3118

Table of saturated values for: R290, CH₃CH₂CH₃, Propane

T °C	p Bar	v _l dm ³ /kg	v _g m ³ /kg	h _l kJ/kg	h _g kJ/kg	R kJ/kg	s _l kJ/(kg K)	s _g kJ/(kg K)
64.00	22.992	2.3628	0.01823	377.72	627.68	249.96	1.5691	2.3105
65.00	23.463	2.3766	0.01777	381.07	628.07	247.00	1.5787	2.3092
66.00	23.941	2.3909	0.01732	384.46	628.43	243.97	1.5884	2.3077
67.00	24.426	2.4058	0.01688	387.88	628.75	240.86	1.5981	2.3062
68.00	24.919	2.4212	0.01645	391.36	629.04	237.68	1.6080	2.3047
69.00	25.419	2.4374	0.01603	394.88	629.29	234.41	1.6179	2.3030
70.00	25.927	2.4542	0.01562	398.45	629.50	231.05	1.6280	2.3013
71.00	26.442	2.4719	0.01521	402.08	629.68	227.60	1.6382	2.2995
72.00	26.965	2.4903	0.01481	405.76	629.81	224.05	1.6485	2.2976
73.00	27.496	2.5097	0.01442	409.51	629.90	220.39	1.6589	2.2956
74.00	28.034	2.5301	0.01403	413.34	629.92	216.58	1.6696	2.2935
75.00	28.580	2.5516	0.01366	417.22	629.91	212.69	1.6803	2.2913
76.00	29.134	2.5742	0.01329	421.16	629.85	208.68	1.6913	2.2890
77.00	29.696	2.5983	0.01292	425.19	629.72	204.53	1.7024	2.2865
78.00	30.266	2.6238	0.01256	429.34	629.51	200.17	1.7138	2.2838
79.00	30.844	2.6509	0.01220	433.57	629.24	195.67	1.7254	2.2810
80.00	31.430	2.6800	0.01185	437.90	628.89	190.99	1.7372	2.2780
81.00	32.024	2.7111	0.01150	442.35	628.46	186.11	1.7493	2.2748
82.00	32.626	2.7447	0.01115	446.91	627.93	181.02	1.7617	2.2714
83.00	33.236	2.7810	0.01081	451.62	627.30	175.68	1.7745	2.2678
84.00	33.854	2.8204	0.01047	456.47	626.56	170.09	1.7876	2.2638
85.00	34.481	2.8636	0.01014	461.49	625.68	164.19	1.8012	2.2596
86.00	35.115	2.9111	0.00980	466.70	624.66	157.96	1.8152	2.2550
87.00	35.757	2.9638	0.00947	472.12	623.47	151.35	1.8297	2.2500
88.00	36.407	3.0229	0.00913	477.79	622.09	144.30	1.8449	2.2445
89.00	37.065	3.0898	0.00879	483.75	620.48	136.73	1.8608	2.2384
90.00	37.731	3.1667	0.00845	490.06	618.60	128.54	1.8776	2.2316
91.00	38.404	3.2565	0.00810	496.83	616.35	119.52	1.8957	2.2239
92.00	39.085	3.3638	0.00775	504.15	613.67	109.52	1.9151	2.2151
93.00	39.773	3.4963	0.00737	512.26	610.40	98.15	1.9366	2.2047
94.00	40.469	3.6675	0.00697	521.52	606.27	84.75	1.9612	2.1921
95.00	41.171	3.9070	0.00652	532.78	600.70	67.92	1.9911	2.1756
96.00	41.881	4.3059	0.00596	548.51	592.03	43.52	2.0330	2.1509
96.67	42.359	5.0660	0.00507	572.70	572.70	0.00	2.0979	2.0979

Copyright © 1999 Dep. of Energy Engineering, DTU
M.J. Skovrup & H.J.H Knudsen

PT. TEACH INTEGRATION
Komp. Pertokoan Ciptapuri Blok GG/9 Sekupang Batam

Phone: +62 778 323 768
Fax: +62 778 323 768
E-mail: teach.integration@gmail.com

<http://teachintegration.wordpress.com>

mc-22

	Temp [C]	Pressure (L) [psia]	Pressure (V) [psia]	Density (L) [kg/m ³]	Density (V) [kg/m ³]	Enthalpy (L) [kJ/kg]	Enthalpy (V) [kJ/kg]
1	-60.00	6.170	6.132	601.5	1.075	60.56	504.1
2	-55.00	7.987	7.941	596.0	1.366	71.46	510.0
3	-50.00	10.20	10.15	590.4	1.715	82.48	516.0
4	-45.00	12.88	12.82	584.7	2.130	93.60	522.0
5	-40.00	16.07	16.00	578.9	2.618	104.9	528.0
6	-35.00	19.85	19.77	573.1	3.188	116.2	534.0
7	-30.00	24.29	24.19	567.2	3.849	127.7	539.9
8	-25.00	29.44	29.33	561.1	4.611	139.4	545.8
9	-20.00	35.39	35.27	555.0	5.483	151.2	551.6
10	-15.00	42.22	42.08	548.7	6.478	163.1	557.5
11	-10.00	49.99	49.84	542.3	7.607	175.2	563.2
12	-5.000	58.79	58.62	535.8	8.883	187.5	568.9
13	0.0	68.70	68.52	529.1	10.32	200.0	574.5
14	5.000	79.80	79.60	522.2	11.94	212.7	580.0
15	10.00	92.18	91.97	515.2	13.75	225.5	585.4
16	15.00	105.9	105.7	507.9	15.77	238.6	590.7
17	20.00	121.1	120.9	500.4	18.04	252.0	595.9
18	25.00	137.9	137.6	492.6	20.57	265.5	600.9
19	30.00	156.2	156.0	484.6	23.41	279.4	605.7
20	35.00	176.4	176.1	476.2	26.57	293.5	610.2
21	40.00	198.3	198.0	467.4	30.12	308.0	614.6
22	45.00	222.2	221.9	458.3	34.10	322.8	618.6
23	50.00	248.1	247.8	448.6	38.59	337.9	622.2
24	55.00	276.2	275.8	438.4	43.68	353.5	625.4
25	60.00	306.5	306.2	427.5	49.48	369.6	628.1

	Entropy (L) [kJ/K-kg]	Entropy (V) [kJ/K-kg]	Cv (L) [kJ/K-kg]	Cv (V) [kJ/K-kg]	Cp (L) [kJ/K-kg]	Cp (V) [kJ/K-kg]
1	0.4284	2.510	1.410	1.149	2.169	1.358
2	0.4789	2.490	1.421	1.171	2.189	1.384
3	0.5287	2.472	1.432	1.194	2.211	1.412
4	0.5779	2.456	1.445	1.217	2.233	1.441
5	0.6264	2.442	1.458	1.242	2.257	1.471
6	0.6745	2.429	1.471	1.266	2.283	1.503
7	0.7221	2.418	1.485	1.292	2.309	1.536
8	0.7693	2.407	1.500	1.317	2.338	1.570
9	0.8160	2.398	1.515	1.344	2.367	1.607
10	0.8624	2.390	1.531	1.370	2.399	1.645
11	0.9085	2.383	1.547	1.398	2.433	1.684
12	0.9544	2.377	1.563	1.425	2.468	1.726
13	1.000	2.371	1.580	1.454	2.506	1.771
14	1.045	2.366	1.598	1.482	2.547	1.818
15	1.091	2.362	1.616	1.511	2.590	1.868
16	1.136	2.358	1.634	1.541	2.637	1.921
17	1.181	2.354	1.653	1.571	2.687	1.979
18	1.226	2.351	1.673	1.601	2.742	2.043
19	1.271	2.348	1.692	1.632	2.802	2.112
20	1.317	2.345	1.713	1.664	2.868	2.190
21	1.362	2.341	1.734	1.696	2.942	2.277
22	1.408	2.338	1.755	1.729	3.025	2.378
23	1.454	2.334	1.777	1.763	3.121	2.495
24	1.500	2.329	1.800	1.798	3.234	2.636
25	1.548	2.324	1.823	1.834	3.369	2.809

Lampiran 6

Perhitungan laju alir massa udara yang melewati duct.

untuk perhitungan laju alir massa udara menggunakan dua persamaan, yaitu Bernoulli dan kontinuitas.

- Hukum Bernoulli.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho (V_1)^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho (V_2)^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2)^2 - \frac{1}{2} \rho (V_1)^2 \dots\dots\dots(1)$$

Hukum kontinuitas

$$Q = A \cdot V \rightarrow Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \rightarrow V_1 = \frac{Q_2}{A_1} ; V_2 = \frac{Q_1}{A_2} \dots\dots\dots(2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (1) dan (2) maka :

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_1}\right)^2$$

Sehingga :

$$Q_2 = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2} \rho \left(\frac{1}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{1}{A_1}\right)^2}$$

$$Q_2 = \frac{2 P_1 - P_2}{\rho \left(\frac{1}{A_2}\right)^2 - \rho \left(\frac{1}{A_1}\right)^2}$$

$$Q_2 = \frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{\left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1}\right)^2}$$

$$Q_2 = \frac{A_2^2 2(P_1 - P_2)/\rho}{\left(\frac{A_2}{A_2} - \frac{A_2}{A_1}\right)^2}$$

$$Q_2 = \frac{A_2^2 2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}$$

$$Q = \sqrt{\frac{A_2^2 2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)/\rho}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

$$Q = C_d \cdot A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}}$$

$$Q = C \cdot A_2 \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho} \dots\dots\dots(3)$$

Untuk mendapatkan nilai dari laju alir massa udara (\dot{m}) maka persamaan (3) disubstitusikan pada rumus laju alir massa di bawah ini.

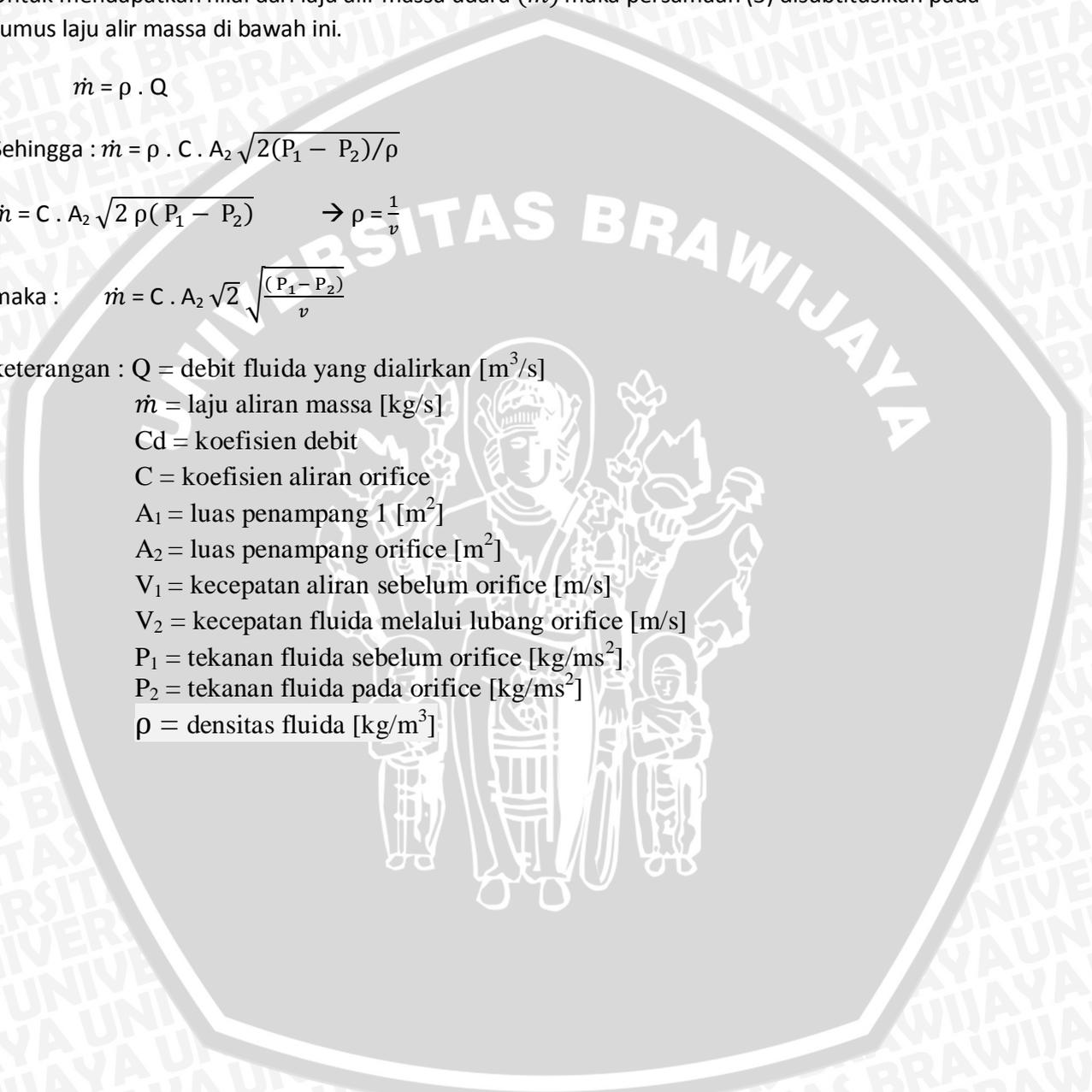
$$\dot{m} = \rho \cdot Q$$

Sehingga : $\dot{m} = \rho \cdot C \cdot A_2 \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho}$

$$\dot{m} = C \cdot A_2 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)} \quad \rightarrow \rho = \frac{1}{v}$$

maka : $\dot{m} = C \cdot A_2 \sqrt{2} \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{v}}$

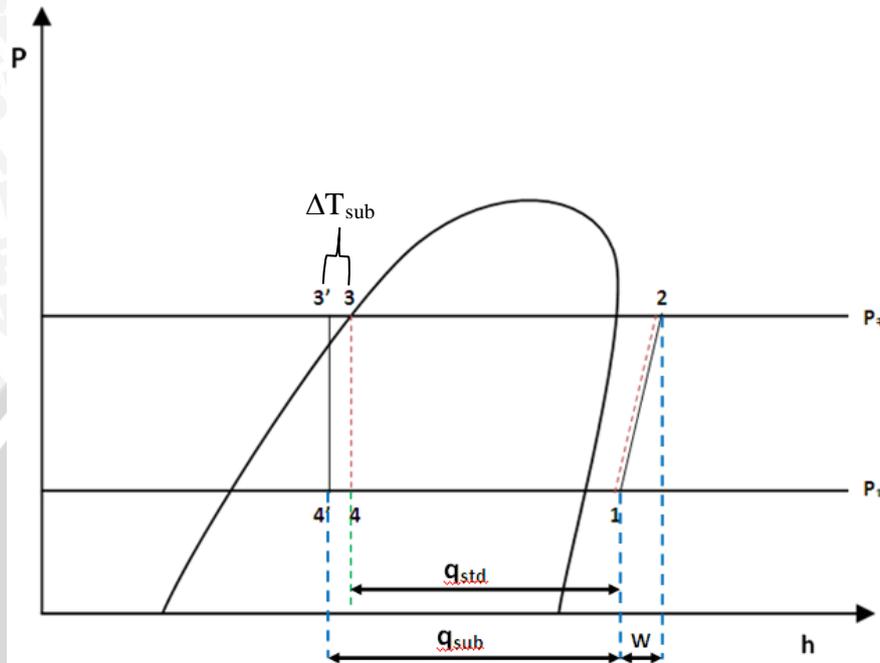
- keterangan :
- Q = debit fluida yang dialirkan [m³/s]
 - \dot{m} = laju aliran massa [kg/s]
 - C_d = koefisien debit
 - C = koefisien aliran orifice
 - A₁ = luas penampang 1 [m²]
 - A₂ = luas penampang orifice [m²]
 - V₁ = kecepatan aliran sebelum orifice [m/s]
 - V₂ = kecepatan fluida melalui lubang orifice [m/s]
 - P₁ = tekanan fluida sebelum orifice [kg/ms²]
 - P₂ = tekanan fluida pada orifice [kg/ms²]
 - ρ = densitas fluida [kg/m³]



Lampiran 7

Rumus $T_{\text{subcooler}}$

Cara mendapatkan temperatur *subcooler* dan efek nya terhadap unjuk kerja mesin pendingin.



Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa proses *subcooling* terjadi pergeseran dari titik 3 menjadi 3' sehingga $T_{\text{subcooler}}$ dapat dicari melalui persamaan di bawah ini.

$$\Delta T_{\text{sub}} = T_{1\text{sub}} - T_{2\text{sub}} \rightarrow \Delta T_{\text{sub}} = T_3 - T_{3'}$$

Dimana :

ΔT_{sub} = temperatur *subcooling* (perbedaan temperatur masuk dan keluar *subcooling*) [°C]

$T_{1\text{sub}}$ = temperatur masuk *subcooler* [°C]

$T_{2\text{sub}}$ = temperatur keluar *subcooler* [°C]

Sehingga :

Proses *subcooling* menjadi (1 – 2 – 3' – 4') $\rightarrow T_{3'} = T_4$

$$Q_{\text{sub}} = (h_1 - h_{4'})$$

$$W = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]$$

Sehingga nilai COP_{sub} ,

$$COP = \frac{q_1}{W} = \frac{h_1 - h_{4f}}{\frac{k}{k-1} R \cdot T_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{k-1/k} - 1 \right]}$$

