

RANCANGAN SISTEM PENDINGIN PADA MESIN BERKAS ELEKTRON 300 keV/20 mA

Mukhammad Cholil, Suprpto, Saminto

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

E-mail:m.cholil@batan.go.id

ABSTRAK

RANCANGAN SISTEM PENDINGIN PADA MESIN BERKAS ELEKTRON 300 keV/20 mA. Telah dilakukan perancangan sistem pendingin pada Mesin Berkas Elektron 300 keV/20 mA. Rancangan ini didasarkan pada perhitungan disipasi daya listrik setiap komponen MBE yang terkonversi menjadi panas. Total disipasi panas yang terjadi pada Sumber Tegangan Tinggi (STT), trafo terisolir dan bejana iradiasi adalah 6,495 kW. Beban pemanasan ini harus mampu diatasi oleh sistem pendingin melalui cooling capacity yang dihasilkan dan ditransfer melalui media air pendingin dengan spesifikasi debit 0,556 L/s dan suhu 10 °C. Untuk itu diperlukan spesifikasi sistem pendingin dengan menggunakan Refrigeran-22, bekerja pada suhu evaporasi 6 °C, suhu kondensasi 50 °C dan daya kompresi 1.200 W. Perhitungan dalam sistem refrigerasi ini, didapatkan COP (Coefficient of Performance) sebesar 5,69. Hal ini berarti, dengan heating load yang diberikan, sistem refrigerasi menunjukkan kinerja yang baik berdasarkan daya kompresi yang dilakukan.

Kata kunci : heating load, cooling capacity, COP.

ABSTRACT

DESIGN OF COOLING SYSTEM OF 300 keV/ 20 mA ELECTRON BEAM MACHINE. Design of cooling system of 300 keV/20 mA Electron Beam Machine has been done. This design is based on the calculation of the power dissipation in each of MBE component that is converted into heat. Total heat dissipation that occurs at the High Voltage Source (HVS), transformer isolated and vessel irradiation is 6.495 kW. Heating load should be able to be overcome by the cooling system through the cooling capacity generated and transferred through the medium of the cooling water specifications 0.556 L/s and temperature 10 °C. For the purpose, it is required specification of the cooling system using Refrigerant-22, working at 6 °C of temperature evaporation, 50 °C of temperature condensation and 1,200 W of power compression. Calculations in the refrigeration system, it is obtained COP (coefficient of performance) 5.69. This means, with the given heating load, refrigeration systems shows good performance based on the work compression that be done.

Key words : heating load, cooling capacity, COP.

PENDAHULUAN

Mesin pemercepat elektron yang sering disebut sebagai Mesin Berkas Elektron (MBE) adalah satu jenis teknologi baru yang telah dikembangkan pada dua dekade yang lalu sebagai sumber radiasi pengion (elektron berenergi) pada proses iradiasi suatu produk industri. PTAPB akhir-akhir ini sedang melakukan rancangbangun MBE dengan kapasitas 300 keV/20 mA untuk proses pra-vulkanisasi lateks karet alam. Pemanfaatan teknologi MBE untuk proses iradiasi di negara maju telah lama digunakan di bidang industri, lingkungan, dan kedokteran. Teknologi MBE termasuk teknologi nuklir yang

banyak dimanfaatkan di bidang industri untuk proses radiasi berbagai produk industri. Di bidang lingkungan digunakan untuk pengolahan limbah polusi industri gas SO_x dan NO_x. Sedangkan, di bidang kedokteran MBE biasa digunakan untuk sterilisasi peralatan medis.

Di dalam MBE, daya listrik yang bekerja di setiap komponen tidak seutuhnya dikonversi menjadi kerja. Hal ini terkait dengan rugi-rugi pada setiap komponen MBE sehingga berdampak pada besarnya efisiensi setiap komponen. Semakin besar perbandingan daya output dan daya input pada komponen, semakin besar pula efisiensi komponen tersebut. Disipasi panas ini harus dihilangkan karena

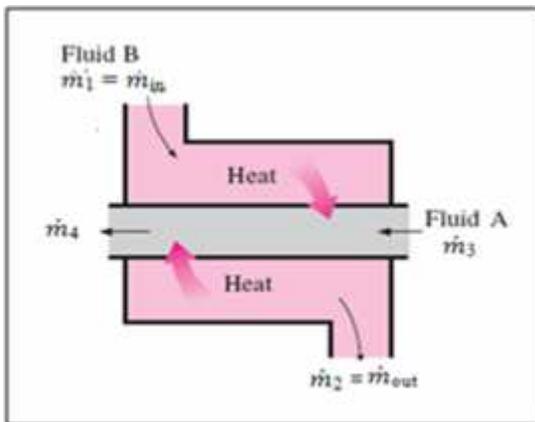
akan berakibat pada penurunan kinerja komponen MBE. Di dalam makalah ini dibahas tentang sistem pendingin untuk komponen-komponen MBE yaitu ; trafo terisolir, sumber tegangan tinggi dan bejana iradiasi. Besarnya daya yang bekerja pada masing-masing komponen tersebut berturut-turut adalah 625 Watt dan 6 kW^[1]. Untuk mendinginkan komponen tersebut dibutuhkan fluida pendingin sebagai media pemindah panas.

DASAR TEORI

Dalam perencanaan sistem pendingin untuk Mesin Berkas Elektron (MBE) 300 keV/20 mA, dibahas teori tentang HE pada *reservoir* air pendingin, yaitu bagaimana memaksimalkan perpindahan panas dan penentuan dimensi *reservoir* air pendingin, serta penentuan koefisien kinerja atau COP (*coefficient of performance*) mesin refrigerasi sebagai bahan perhitungan unjuk kerja dari sistem refrigerasi tersebut. Koefisien kinerja dari sistem refrigerasi adalah perbandingan besar panas yang dapat dipindahkan (efek refrigerasi) dengan besar kerja yang dilakukan kompresor.

Perpindahan panas pada *chiller*

Di dalam *chiller*, perpindahan panas terjadi secara konveksi di dalam reservoir air pendingin dengan mengikuti prinsip kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prinsip perpindahan panas dalam *chiller*.

Kesetimbangan massa harus terjadi pada tiap fluida kerja, yang dalam hal ini adalah berupa air, dan refrigeran.

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

Untuk masing-masing fluida yang tidak saling bercampur,

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{water}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{Refrigeran} \quad (1)$$

Dengan \dot{m} adalah kecepatan alir massa fluida kerja (kg/s). Kesetimbangan energi adalah sebagai berikut :

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = dE_{sistem} / dt = 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 \quad (2)$$

dengan h (kJ/kg) adalah enthalpi masing-masing fluida keluar masuk sistem.

Persamaan (2) tersebut dipenuhi apabila :

1. Tidak ada panas yang masuk dan ke luar sistem $\dot{Q} = 0$
2. Tidak ada kerja yang masuk ke dalam sistem $\dot{W} = 0$
3. Jumlah energi kinetik di dalam sistem dianggap nol ($K_e = 0$)
4. Jumlah energi potensial di dalam sistem dianggap nol ($P_e = 0$)

Dengan kombinasi kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi, pada persamaan (1) dan (2)^[2] akan diperoleh :

$$\dot{m}_w (h_1 - h_2) = \dot{m}_R (h_4 - h_3) \quad (3)$$

Jadi, untuk menyelesaikan persamaan (3)^[2], diperlukan enthalpi pada masing-masing titik fluida.

Untuk menghitung perpindahan panas yang terjadi antara refrigeran ke air dalam bentuk Watt (J/s) adalah sebagai berikut. Perpindahan panas dari refrigeran ke air, kalor dari suhu dingin akan ditransfer dari refrigeran ke air sesuai dengan persamaan :

$$E_{in} - E_{out} = dE/dt = 0$$

$$E_{in} = E_{out}$$

$$\dot{Q}_{w,m} + \dot{m}_w h_1 = \dot{m}_w h_2 \quad (4)$$

Untuk air $\dot{Q}_w = \dot{m}_w (h_2 - h_1)$, dan untuk refrigeran $\dot{Q}_R = \dot{m}_R (h_4 - h_3)$ dengan $\dot{Q}_w = \dot{Q}_R$. Untuk menghitung energi panas yang diterima oleh air, digunakan persamaan^[2]:

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times C_w \times T \quad (5)$$

dengan,

\dot{Q}_w = jumlah kalor yang diterima oleh air atau jumlah kalor yang di lepas oleh refrigeran (kJ/s)

\dot{m}_w = laju massa air yang akan didinginkan (kg/s)

C_w = kalor jenis air (kJ/kg°C)

T = selisih suhu masuk dan keluar (°C)

Sistem Refrigerasi

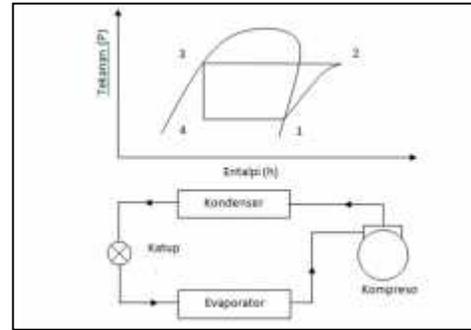
1. Penentuan spesifikasi reservoir pendingin

Perhitungan pertama yang harus dilakukan untuk mendesain sistem pendingin Mesin Berkas Elektron (MBE) 300 keV/20 mA adalah mengetahui masing-masing disipasi panas pada subsistem yang akan didinginkan. Disipasi panas ini biasanya dinyatakan dalam *Watt*. Jumlah seluruh daya terdisipasi ini, harus mampu didinginkan oleh besarnya *cooling load* yang dihasilkan pada sistem pendingin melalui media air pendingin. Di dalam *reservoir* hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan adalah :

- Besarnya volume air pendingin, karena hal ini akan mempengaruhi dimensi dari reservoir.
- Besarnya suhu *inlet* dan *outlet* air pendingin yang dipengaruhi oleh *cooling capacity* dalam *evaporator* sistem refrigerasi.
- Besarnya kapasitas pendinginan yang sangat bergantung pada spesifikasi sistem refrigerasi.

2. Perhitungan sistem refrigerasi

Mesin refrigerasi dengan kompresi uap merupakan sistem yang terbanyak digunakan dalam daur refrigerasi. Dalam sistem kompresi uap diperlukan 4 komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Fungsi dari masing-masing alat tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Sistem kompresi uap standar.

1) Kompresor

Pada kompresor terjadi pemampatan refrigeran untuk menaikkan tekanannya, dengan naiknya tekanan maka temperatur refrigeran juga naik, sehingga setelah keluar dari kompresor, refrigeran tadi berbentuk uap panas lanjut. Energi yang diperlukan untuk kompresi diberikan oleh motor listrik yang menggerakkan kompresor. Jadi dalam proses kompresi, energi diberikan kepada refrigeran.

2) Kondensator

Uap refrigeran yang bertekanan dan bertemperatur tinggi pada akhir kompresi dengan mudah dicairkan dengan menggunakan fluida pendingin seperti udara atau air. Dengan kata lain, uap refrigeran melepaskan kalor laten pengembunan kepada fluida pendingin sehingga refrigeran tadi mengembun dan menjadi cair. Pada siklus ideal tidak terjadi penurunan tekanan dan temperatur di kondensator. Sedangkan pada siklus aktual terjadi penurunan tekanan yang diikuti penurunan temperatur yang terjadi karena gesekan antara refrigeran dengan pipa kondensator.

3) Katup Ekspansi (pipa kapiler)

Setelah uap refrigeran dicairkan di dalam kondensator kemudian refrigeran cair yang bertekanan tinggi tersebut diekspansikan melalui pipa kapiler (katup ekspansi). Pada saat melewati pipa kapiler tekanan refrigeran mulai turun dan diikuti dengan turunnya temperatur refrigeran secara drastis.

4) Evaporator

Cairan refrigeran yang telah diekspansikan di dalam katup ekspansi (pipa kapiler) sehingga turun tekanan serta temperaturnya kemudian masuk ke dalam pipa evaporator. Di dalam pipa evaporator cairan refrigeran menguap secara berangsur-angsur karena menerima kalor laten sebanyak kalor laten pengembunan dari media yang didinginkan dalam hal ini air pendingin. Selama proses penguapan, didalam pipa akan terdapat campuran refrigeran-refrigeran

dalam fasa cair dan fasa uap. Pada siklus ideal, temperatur dan tekanan di dalam pipa dianggap konstan. Tetapi pada kondisi aktualnya terjadi penurunan tekanan dan temperatur yang diakibatkan karena adanya rugi-rugi gesek antara refrigeran dan pipa-pipa evaporator.

Pada suatu sistem refrigerasi, besarnya kalor yang diambil oleh refrigeran pada evaporator dari media yang didinginkan (air pendingin) akan sebanding dengan selisih entalpi antara keluaran dan masukan evaporator, ini dikenal dengan sebutan dampak refrigerasi (qE)^[4].

$$qE = h_1 - h_4 \quad (6)$$

dengan,

qE = dampak refrigerasi, (kJ/kg) atau (Btu/lb)

h_2 = entalpi refrigeran keluaran evaporator, (kJ/kg) atau (Btu/lb)

h_1 = entalpi refrigeran masukan evaporator, (kJ/kg) atau (Btu/lb)

Pada proses kompresi, entalpi refrigeran akan mengalami kenaikan akibat energi yang ditambahkan oleh kompresor kepada refrigeran. Besarnya kenaikan energi refrigeran akan sebanding dengan kerja kompresor yang dinyatakan dengan persamaan^[4]:

$$W = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (7)$$

dengan:

W = kerja kompresor (kW)

\dot{m} = laju alir refrigerant (kg/s)

h_2 = entalpi refrigeran keluaran kompresor, (kJ/kg) atau (Btu/lb)

h_1 = entalpi refrigeran masukan kompresor, (kJ/kg) atau (Btu/lb)

Perbandingan antara besarnya kalor dari media yang didinginkan (air pendingin) yang dapat diambil oleh evaporator dengan kerja kompresor yang harus diberikan disebut sebagai koefisien kinerja (*coefficient of performance, COP*)^[4],

$$COP = \frac{qE}{W} \quad (8)$$

atau,

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

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam desain sistem pendingin Mesin berkas Elektron 300 keV/20 mA dilakukan melalui tahapan sebagai berikut :

- Perhitungan disipasi panas yang terjadi pada setiap komponen yang akan didinginkan. Perhitungan disipasi panas ini besarnya bervariasi untuk komponen-komponen yang ada di MBE.
- Perhitungan volume dan suhu air pendingin pada *reservoir*. Jumlah disipasi panas yang terjadi harus mampu diatasi oleh *cooling load* yang dihasilkan oleh sistem refrigerasi melalui media air pendingin. Volume air pendingin akan menentukan ukuran *reservoir* yang digunakan.
- Perhitungan entalpi setiap tingkat keadaan pada sistem refrigerasi. Penentuan entalpi dapat dilakukan dengan menggunakan diagram *Mollier* dari R-22. Diagram *mollier* terbagi menjadi 2 bagian *saturated vapour* dan *super heated vapour*.
- Perhitungan COP (Coefficient of Performance). Tahap terakhir dari desain ini adalah menghitung COP sistem refrigersi. Hal ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja dari sistem refrigerasi terkait dengan *cooling load* yang dihasilkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan *reservoir* dan perhitungan sistem refrigerasi digunakan sifat-sifat fisis dari fluida pendingin, yaitu air dan Refrigeran-22. Sifat-sifat fisis tersebut ditunjukkan pada Tabel 1. Kondisi operasi sistem pendingin yaitu suhu evaporator 6 °C dan kondensor 50 °C.

Daya terdisipasi pada komponen MBE, besarnya ditentukan sebagai berikut : untuk mengetahui daya terdisipasi pada trafo terisolir, telah dilakukan pengujian daya dengan resistor 1,08 Ohm. Hasil pengujian dan perhitungan efisiensi trafo ditunjukkan pada Tabel 2. Presentase daya terdisipasi (P_d) adalah :

$$P_d = (1 -) \times P \quad (9)$$

Tabel 1. Sifat-sifat fisis air dan Refrigeran-22 didasarkan pada suhu evaporator 6 °C dan kondensor 50 °C.

No.	Besaran	Nilai	Satuan
1.	Kalor jenis air (C_w)	4,2	$\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
2.	Enthalpi (h_1)	407,489	kJ/kg
3.	Enthalpi (h_2)	433,091	kJ/kg
4.	Enthalpi (h_3)	263,264	kJ/kg
4.	Enthalpi (h_4)	263,264	kJ/kg

Tabel 2. Hasil Pengujian Trafo Terisolir, $R_{\text{beban}} = 1,08 \text{ Ohm}$

	V_{primer} (Volt)	V_{sekunder} (Volt)	I_{primer} (Ampere)	I_{sekunder} (Ampere)	Suhu ($^\circ\text{C}$)	P_{primer} (V_A)	P_{sekunder} (V_A)	Eff () (%)
1	100	10	1.6	10	35	160	100	62.5
2	120	12.5	1.9	12.3	35.1	228	153.75	67.43421
3	150	16	2.3	15.2	35	345	243.2	70.49275
4	175	20	2.7	17.1	34.9	472.5	342	72.38095
5	200	22.5	3	19	35	600	427.5	71.25
6	220	25	3.4	20.3	34.9	748	507.5	67.84759
Efisiensi rata-rata								68.65092

Dari Tabel 2. diketahui bahwa efisiensi trafo terisolir adalah sebesar 68,65 %. Sehingga, perhitungan dengan menggunakan persamaan (9) didapatkan besar daya terdisipasi trafo terisolir adalah 195,93 Watt. Pada sumber tegangan tinggi (STT) daya terdisipasi diasumsikan sebesar 5 %, sehingga didapatkan besar daya terdisipasi adalah 0,3 kW atau 300 Watt. Sedangkan untuk disipasi panas yang terjadi pada bejana iradiasi, daya yang bekerja diasumsikan semua terdisipasi menjadi panas, yaitu 6 kW. Sehingga, total seluruh daya terdisipasi pada komponen MBE adalah 6,495 kW.

Penentuan spesifikasi *reservoir* pendingin

Sistem pendingin pada Mesin Berkas Elektron 300 keV/20 mA berfungsi untuk menjaga komponen Mesin Berkas Elektron dari *over heating*, akibat disipasi daya listrik yang terjadi. Dari total daya yang bekerja pada komponen MBE dapat diketahui disipasi panas yang terjadi adalah 6,495 kW. Semua daya ini diasumsikan berubah menjadi panas. Jika dikonversi ke satuan lain, jumlah ini setara dengan 22.161,85 Btu/h. Namun dalam penentuan sistem refrigerasi dipilih sistem pendingin 3 PK dengan

cooling capacity 24.000 Btu/h^[7], karena spesifikasi ini yang paling mendekati dan mudah ditemui dipasaran. Dengan menggunakan persamaan (5), $\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times C_w \times \Delta T$ dapat dihitung besarnya debit air pendingin (\dot{m}_w) dengan memasukkan $C_w = 4,2 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ dan $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, diperoleh $\dot{m}_w = 556,71 \text{ kg/s}$. Karena $\dot{m}_w = \rho \times \dot{V}$ dan $\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, maka $\dot{V} = 0,556 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 0,556 \text{ L/s}$.

Perhitungan sistem refrigerasi

Sistem pendingin dengan kompresi uap merupakan sistem terbanyak yang digunakan dalam daur refrigerasi. Dalam sistem kompresi uap diperlukan 4 komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator. Dengan bantuan diagram entalpi-tekanan, besaran-besaran penting dalam daur kompresi uap dapat diketahui. Besaran-besaran ini adalah kerja kompresi, dampak refrigerasi dan COP (*coefficient of performance*). COP dipergunakan untuk menyatakan performa (unjuk kerja) dari siklus refrigerasi. Semakin tinggi COP yang dimiliki oleh suatu mesin refrigerasi maka akan semakin baik mesin refrigerasi tersebut. COP tidak mempunyai satuan karena merupakan

perbandingan antara dampak refrigerasi dengan kerja spesifik kompresor (*Watt/Watt*).

Langkah pertama yang harus dilakukan untuk menghitung besaran-besaran dalam daur kompresi uap adalah perhitungan entalpi (kJ/kg) pada masing-masing tingkat keadaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dari acuan sistem pendingin, diketahui bahwa suhu kerja evaporator 6°C dan kondensor bekerja pada suhu 50°C . Dengan menggunakan diagram *mollier* R-22 (*Lampiran 1*) dan Tabel *superheated vapour* R-22^[5] diketahui entalpi untuk setiap keadaan h_1 sampai h_3 berturut-turut adalah 407,489 kJ/kg, 433,091 kJ/kg dan 263,264 kJ/kg. Sedangkan h_4 besarnya sama dengan h_3 karena pada katup ekspansi terjadi proses *isenthalpic* (entalpi konstan).

Besaran pertama yang akan dihitung adalah dampak refrigerasi. Dampak refrigerasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6). Dari perhitungan didapatkan dampak refrigerasi sebesar 144,225 kJ/kg. Berikutnya akan dihitung laju alir refrigeran dengan cara membagi kapasitas refrigerasi dengan dampak refrigerasi. Kapasitas refrigerasi yang digunakan adalah sebesar *heating load* yang terjadi dari disipasi panas, yaitu sebesar 6,495 kW, sehingga didapatkan laju alir refrigeran 0,048 kg/s. Kemudian laju alir refrigeran ini digunakan untuk menghitung besarnya daya kompresor sesuai dengan persamaan (7) dan didapatkan daya kompresor 1,2 kW. Terakhir adalah menghitung COP dari sistem refrigerasi sesuai dengan persamaan (8) sehingga didapatkan COP sistem refrigerasi yang dipilih adalah sebesar 5,69.

KESIMPULAN

Dari hasil perancangan sistem pendingin pada Mesin Berkas Elektron 300 keV/20 mA dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Perhitungan *heating load* yang terjadi pada komponen MBE adalah sebesar 22.161,85 Btu/h, sehingga didapatkan debit air pendingin 0,556 L/s dan suhu 10°C .
2. Berdasarkan jumlah *heating load* yang terjadi, dipilih sistem refrigerasi yang ada di pasaran dan spesifikasi teknisnya paling mendekati dengan hasil rancangan, yaitu: refrigerant yang digunakan adalah R-22, suhu evaporasi 6°C , suhu kondensasi 50°C dan daya kompresor 1.200 W.
3. Didapatkan nilai COP (*coefficient of performance*) adalah 5,69. Hal ini berarti, dengan *heating load* yang terjadi, sistem refrigerasi menunjukkan kinerja yang baik berdasarkan daya kompresi yang dilakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

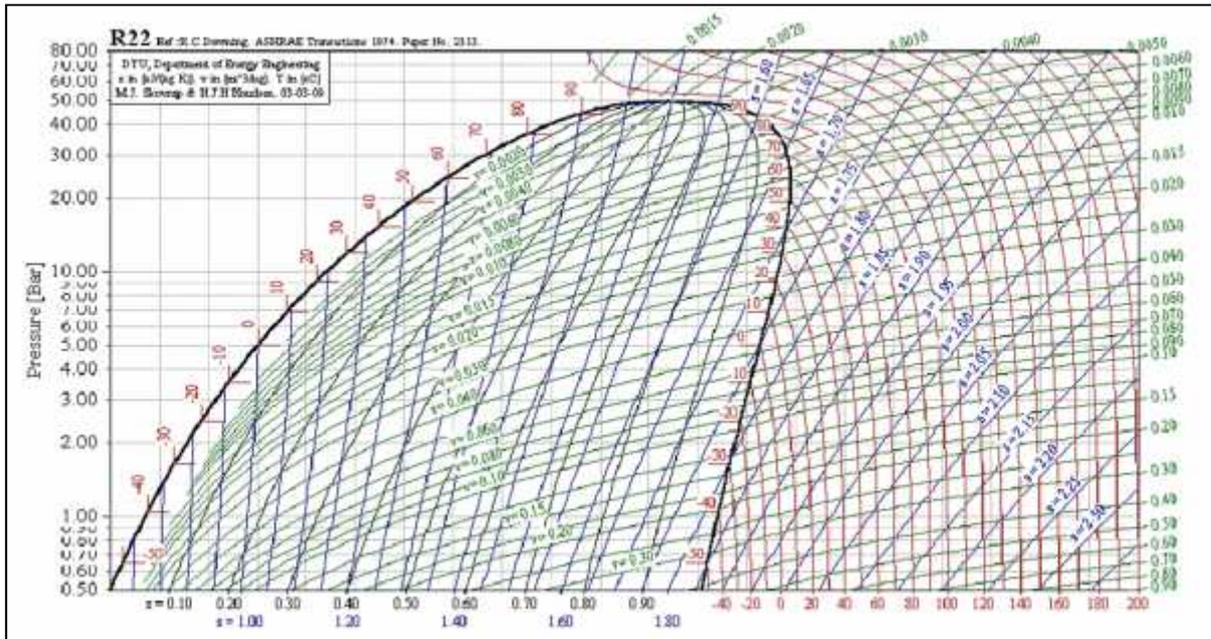
Dengan selesainya perancangan sistem pendingin ini, kami mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh Tim Mesin Berkas Elektron 300 keV/20 mA atas segala masukan yang telah diberikan. Semoga bermanfaat untuk kita semua.

DAFTAR PUSTAKA

1. DARSONO, *Rancangan Dasar Mesin Berkas Elektron 300 keV/20 mA Untuk Industri Lateks Alam*, Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Edisi khusus, Yogyakarta, Juli 2006.
2. C P ARORA., *Refrigeration and Air Conditioning*, Second Edition, International Edition 2001.
3. S. L. Dixon, B. Eng., Ph.D, *Fluid Mechanics, Thermodynamic of Turbomachinery*, Fourth Edition, 1998.
4. CARL L. YAWS., *Handbook of Thermodynamic Diagrams*, Gulf Publishing Company, 1996.
5. YUNUS A.CENGEL, MICHEAL A. BOLES, *Thermodynamics An Engineering Approach*, The McGraw Hill Companies, 2006.
6. ROBERT W. FOX, McDONALD ALAN T, *Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley and Sons*, Inc, 1985.
7. Website : <http://cvastro.com/produk-ac-haier/ac-haier-split-duct>.

TANYA JAWAB

LAMPIRAN



Gambar 1. Diagram Mollier R-22.