Pendinginan Adsorpsi Sebagai Pendinginan Tambahan Untuk Penyimpanan Sayuran Tropis

(Adsorption cooling machine as auxiliary unit for tropical vegetable storage)

Kamaruddin A[1]., Y. Aris Purwanto[1], A. Rofiq, N[2]. dan Aep Saepuluyun[1]

[1] Pusat Pengkajian dan Penerapan Ilmu Teknik Untuk Pertanian Tropika, CREATA-LPPM-IPB
[2]. Staff LSDE-BPPTeknologi

ABSTRAK

Negara tropis seperti Indonesia yang menghasilkan berbagai jenis buah-buahan dan sayuran termasuk hasil kelautan sangat membutuhkan sarana pendinginan untuk mengurangi kehilangan pasca panen, dan menjaga kesegaran produk yang dihasilkan. Sampai saat ini masih banyak peralatan pendinginan yang menggunakan Freon sebagai zat pendingin, yang telah dilarang penggunaannya karena merusak lapisan ozon di atmosfir. Untuk itu, dalam penelitian telah dipilih sistem pendingin pengganti berupa mesin pendingin adsorpsi dengan kombinasi silica-gel dan methanol yang bahan-bahannya tersedia dengan mudah dan tidak mencemarkan lingkungan. Mesin pendingin adsorpsi dapat dioperasikan dengan menggunakan tambahan pemanasan yang dapat dibangkitkan dari sumber-sumber energi terbarukan yang bersih dan akrab lingkungan seperti tenaga surya, biomassa, panas bumi, dll. Dengan memanfaatkan sumber-sumber energi terbarukan tsb. dapat dihasilkan suhu pendingin dibawah 0 °C pada tingkat suhu pemanasan generator antara 70 – 90 °C.

Kata Kunci: *energi terbarukan, adsorpsi, penyimpan dingin, hasil pertanian*

1. PENDAHULUAN

Sistem adsorpsi dengan menggunakan kombinasi silica-gel dan Metanol dipilih sebagai sistem pendinginan tambahan dengan alasan bahwa baik silica-gel maupun methanol mudah didapat di Indonesia tanpa harus import dan harganya juga relatif murah, umpamanya bila dibandingkan dengan sistem absorpsi H_2O-NH_3 atau LiBr-H2O Sistem pendingin tipe adsorpsi ini telah dikaji oleh Oertel dan Fisher (1997) dengan hasil seperti dicantumkan dalam Tabel 1. Dari Tabel ini terlihat bahwa suhu generator yang diperlukan untuk menghasilkan suhu evaporator –2 °C cukup dengan suhu dibawah suhu 90 °C sehingga mudah dibangkitkan dengan sumber-sumber energi terbarukan yang bersih dan tidak mencemarkan lingkungan dan tersedia di pedesaan seperti energi biomassa, surya panas, angin, mikro atau piko hidro. Disamping itu suhu evaporator –2 °C sudah dianggap cukup untuk menciptakan suhu simpan berbagai sayuran beriklim dingin seperti brokoli, lettuce, kol ataupun buah-buahan seperti apel, jeruk, melon, dll. tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk penyimpanan dingin ikan, sehingga dapat mengurangi kehilangan pascapanen.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk membuat rancang bangun mesin pendingin adsorpsi dengan memanfaatkan secara maksimum bahan-bahan serta komponen konstruksi yang tersedia di dalam negeri tanpa tergantung dari import sehingga dapat menekan biaya pembuatannya. Sistem pendingin yang akan dibuat adalah sistem semi kontinyu karena nantinya akan digunakan untuk melengkapi fasilitas pendingin sayur-sayuran dan buah-buahan di berbagai sentra produksi.

2. METODOLOGI

4.1. Prinsip kerja pendingin adsorpsi

Model pendingin adsorpsi silica gel dan Me-OH dapat dilihat pada Gbr.1 Seperti terlihat pada gambar,. pendingin adsorpsi terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu generator-adsorber, kondensor, evaporator, sumber panas dan menara pendingin.

Pada siklus adsorpsi tak sinambung diasumsikan bahwa proses pendinginan terbagi atas 4 siklus kerja, yang dapat dilihat dari diagram PTX dari siklus kerja mesin adsorpsi seperti disajikan pada Gbr.2. Pada saat awal kondisi termodinamik campuran berada pada titik (1). Pada proses regenerasi, panas dialirkan ke re-generator adsorber dari sumber panas yang dapat berupa air panas, radiasi surya langsung ataupun udara panas untuk menghasilkan suhu pendidihan sekitar 70 °C. Pada saat pemanasan terjadi katup (1) dan (3) berada dalam keadan tertutup sedangkan katup (3) terbuka. Karena katup (1) terbuka uap MeOH akan naik ke kondensor dan setelah didinginkan maka suhu MeOH berada pada suhu ekuilibrium Tc dan tekanan PC. Kondisi ini dinyatakan oleh titik (3) pada Gbr. 2., dimana konsentrasi MeOH sudah berkurang dari X1 menjadi X2 karena penguapan tadi. Pada siklus berikutnya katup (1) dan (3) ditutup sedangkan katup (2) dibuka untuk mengalirkan MeOH cair masuk kedalam evaporator. Setelah semua cairan MeOH masuk ke evaporator, katup (2) ditutup sambil menjaga katup (1) tetap dalam keadaan tertutup. Air pendingin kemudian dialirkan ke re-generator adsorber, sedangkan air dingin untuk tujuan penyimpan dingin produk mulai pula dipompa melalui evaporator. Karena terjadi pendinginan tekanan dan suhu ekuilibrium dari campuran silica-gel dan MeOH dalam re-generator adsorber akan turun dan masing-masing berada pada tekanan Pe dan Ta2. Kondisi camparuan dinyatakan oleh titik (4) pada Gbr. 2. Bila katup (3) dibuka, campuran silica-gel dan MeOH yang berada pada kondisi konsentrasi MeOH yang paling minimum, akan meyerap uap MeOH kembali kedalam tabung re-generator-adsorber sehingga terjadilah proses pendinginan sampai mencapi kondisi ekuilibrium baru setelah konsentrasi campuran menjadi jenuh kembali pada kondisi (1) dan konsentrasi X1. Suhu penguapan dari MeOH akan berada Te yang lebih rendah dari suhu euilibrium campuran pada Ta2.

4.2. COP (Coefficient of performance)

Untuk proses terbalikkan (riversibel) besarnya COP untuk system pendinginan adsorpsi dinyatakan oleh (Oertel dan Fisher, 1997):

$$COP|_{carnot} = \frac{Te}{(Tc-Te)} \quad \frac{Tg - Tc}{Tg} \qquad (1)$$

dimana
Te suhu evaporator (°K)
Tc suhu kondensor (°K)
Tg suhu regenerator (°K)

4.3. Thermodinamika Silika gel-Me-OH

Sifat termodinamika campuran silica gel-MeOH, dapat disusun berdasarkan data empiris sehingga dapat digambarkan dalam bentuk kurva PTX (Teng, dkk.,1997, Pons dan Feng, 1997). Hubungan empirik antara Tekanan (P), konsentrasi (X) dan suhu (T) adsorben dinyatakan oleh persamaan yang didapat dari curve fit data (Oetler & Fischer , 1997).

$$X(T,Ts) = A(T).\exp\left(B(T).\frac{T}{Ts}\right) \qquad (2)$$

dimana :
T, merupakan suhu dari adsorben (°K)
Ts, suhu jenuh dari refrigeran /adsorbat (°K)
A(T) dan B(T) koefisien yang merupakan fungsi dari suhu adsorben

Lebih lanjut koefisien A dan B dari pers. (2) ditentukan sbb.
Koefisien A dinyatakan oleh

$$A(T) = a1.\exp\left(\frac{a2}{T}\right) \qquad (3)$$

dimana
a1= 1.45E-9
a2=7568.5352

dan koefisien B sbb.

$$B(T) = b1 + b2.T + b3.T^2 + b4.T^3 + b5.T^4 + b6.T^5 \qquad (4)$$

dimana:

b1= -18929.1	b4=0.004525
b2= 273.8533	b5=-6.46E-06
b3=-1.57816	b6=3.66E-09

4.4. Pendugaan suhu Tg1 dan Ta1.

Tg1 dan Ta1 pada Gbr.2 dari siklus pendingin dapat diduga dengan persamaan berikut :

$$X(Tg1,Tc) = X(Ta2,Te) \qquad (5)$$

$$X(Tg2,Tc) = X(Ta1,Te) \qquad (6)$$

Sehingga

$$Tg1 = \frac{Tc}{B(Tg1)}.Ln\left(\frac{X(Ta2,Te)}{A(Tg1)}\right) \qquad (7)$$

dan

$$Ta1 = \frac{Te}{B(Tg2)}.Ln\left(\frac{X(Tg2,Tc)}{A(Tg2)}\right) \qquad (8)$$

Dari hubungan tekanan jenuh (Ps) dengan suhu jenuh refrigeran (Ts) berlaku persamaan Clausius-Clapeyron :

$$Ln(p) = a - \frac{c}{Ts} \qquad (9)$$

Dimana dari tabulasi hubungan tekanan jenuh dan suhu jenuh methanol didapat persamaan empiris sebagai berikut :

$$Ln\ (P) = 25.169647 - 4650.2884\ (1/Ts) \qquad (10)$$

Dengan hubungan-hubungan pada pers. (2) sampai dengan (10), dapat dihitung garis dari titik 1-2 dan garis 3-4 (grafik PTX, Gbr. 2) , atau dengan kata lain adalah prediksi suhu adsorben dalam generator dengan mengetahui tekanan jenuh pada Kondensor, serta konsentrasi campuran dalan regenerator -adsrober, yaitu:

$$T34(p) = \left(\frac{\frac{c}{a-\ln(p)}}{B(Tg2)}\right).Ln\left(\frac{X\left(Tg2,\left(\frac{c}{a-\ln(p)}\right)\right)}{A(Tg2)}\right) \qquad (11)$$

dan

$$T12(p) = \left(\frac{\frac{c}{a-\ln(p)}}{B(Ta2)}\right).Ln\left(\frac{X\left(Ta2,\left(\frac{c}{A-\ln(p)}\right)\right)}{A(Ta2)}\right) \qquad (12)$$

4.5. Perhitungan panas laten adsorpsi dan desorpsi silica gel- MeOH

Panas laten adsorpsi dan desorpsi, h, dapat dicari dari persamaan Clausius-Clapeyron :

$$\frac{d}{dT}Ln(p) = \frac{h}{R.T^2} \qquad (13)$$

dimana P adalah tekanan uap MeOH dalam re-generator-adsrober, R adalah tetapan gas dan T adalah suhu adsorben (silica gel). Kita dapat mencari panas yang diperlukan untuk proses adsorbsi dan desorbsi dari campuran silica-gel dan MeOH . Persamaan suhu jenuh Ts dapat diubah sbb :

$$\frac{1}{Ts} = \frac{1}{B(T).T}.Ln\left(\frac{X(T,Ts)}{A(T)}\right) \qquad (14)$$

dengan mensubstitusikan pers. (14) kedalam pers. (9) didapat :

$$\ln(p) = a - c.\frac{1}{B(T).T}.Ln\left(\frac{X(T,Ts)}{A(T)}\right) \qquad (15)$$

Hasil diferensial pers.(15) terhadap T untuk mendapatkan nilai panas desorpsi dan adsorpsi berdasarkan persamaan Calusius –Clapeyron, adalah :

$$\frac{d}{dT}\left(a - \left(\frac{c}{B(T).T}.\ln\left(\frac{X}{A(T)}\right)\right)\right) =$$
$$\frac{c}{B(T)^2.T}.Ln\left(\frac{X}{A(T)}\right).\frac{d}{dT}B(T) + \frac{c}{B(T).T^2}.\ln\left(\frac{X}{A(T)}\right) + \frac{c}{B(T).T.A(T)}.\frac{d}{dT}A(T) \qquad (16)$$

Dari pers.(14) diketahui hubungan

$$\frac{B(T1).T}{Ts} = \ln\left(\frac{X(T,Ts)}{A(T)}\right) \qquad (17)$$

dan setelah disubstitusikan kedalam pers. (16) di dapat besarnya panas desorpsi atau adsorspsi dengan menggunakan persamaan berikut :

$$c\left(\frac{1}{Ts.B(T)}.\frac{d}{dT}B(T) + \frac{1}{Ts.T} + \frac{1}{B(T).A(T).T}.\frac{d}{dT}A(T)\right) = \frac{h}{R.T^2} \qquad (18)$$

Sehingga panas laten adsorpsi (Ha) berdasarkan suhu penguapan MeOH, Te, adalah :

$$c.R.T^2\left(\frac{1}{Te.B(T)}.\frac{d}{dT}B(T) + \frac{1}{Te.T} + \frac{1}{B(T).A(T).T}.\frac{d}{dT}A(T)\right) = Ha(T,Te) \qquad (19)$$

dan panas laten desorpsi, Hd, menjadi :

$$c.R.T^2\left(\frac{1}{Tc.B(T)}\cdot\frac{d}{dT}B(T)+\frac{1}{Tc.T}+\frac{1}{B(T).A(T).T}\cdot\frac{d}{dT}A(T)\right)=Hd(T,Tc) \quad (20)$$

Sehingga panas total adsorpsi dan desorpsi untuk massa silica gel sebesar m, kg, yang diikuti oleh perubahan konsentrasi silica gel-MeOH, menjadi :

$$Hads=\int_{Ta1}^{Ta2} Ha.m.\frac{\partial X(T,Te)}{\partial T}dT \quad (21)$$

$$Hdes=\int_{Tg1}^{Tg2} Hd.m.\frac{\partial X(T,Tc)}{\partial T}dT \quad (22)$$

4.6. Perhitungan panas sensible

Panas sensible dari adsorbent dengan jumlah massa silica gel, m, dapat dinyatakan oleh :

$$Q1=\int_{Ta2}^{Tg2} Cpsil(T).m.dT \quad (23)$$

dimana *Cpsil(T)* adalah panas spesifik dari adsorben silica yang berubah terhadap suhu, tetapi disini untuk menyederhanakan perhitungan nilai *Cpsil* dianggap konstan yaitu *Cpsil* = 924 j/kg K.

Untuk mendapatkan kondisi ekuilibrium perlu pula diperhitungkan jumlah panas yang diperlukan untuk memansakan dan mnedinginkan re-generator selama proses pemanasan dan pendinginan. Besarnya panas yang dibutuhkan atau yang dibuang dari re-genertaor dapat dihitung sbb :

$$Q2=\int_{Ta2}^{Tg2} Cpgen(T).mgen.dT \quad (24)$$

dimana *Cpgen(T)* dan *mgen* adalah panas spesifik dan massa dari generator.

Panas sensible dari refrigeran, MeOH dapat dihitung dengan menggunakan hubungan berikut :

$$Qd3=\int_{Ta2}^{Tg1} m.X(Ta2,Te).Cvref(T).dT+\int_{Tg1}^{Tg2} m.Cpref(T).X(T,Tc).dT \quad (25)$$

dimana *Cvref(T)* adalah panas spesifik cairan refrigeran pada volume konstan, dan *cprep(T)* adalah panas spesifik pada tekanan konstan.

Proses pendinginan campuran dalam re-generator-adsorber dihitung dengan persamaan berikut, dimana Cpg(T) adalah panas spesifik gas refrigeran pada tekanan konstan.

Kesetimbangan panas di evaporator, Q4, yang akan menghasilkan efek pendinginan Qref, dan panas yang dibutuhkan untuk mendinginkan kondensor Q5 dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q4 = m.(X2 - X3).L3(T2) + \int_{Tc}^{T3} m.Cv13(T).(X1 - X2) \qquad (28)$$

$$Q5 = \int_{Tg2}^{Tg1} m.Cpg3(T).(Tc - T).\frac{\partial X(T,Tc)}{\partial T}.dT + m(X1 - X2).L3(Tc) \qquad (29)$$

dimana L3(Tc) adalah panas laten refrigeran pada suhu kondensor, Cv13(T) panas spesifik dari cairan jenuh refrigeran pada volume konstan.

4.7. Perhitungan nilai COP nyata

Berdasarkan hasil perhitungan tentang besarnya efektivitas pendinginan dan pasokan energi yang dibutuhkan pada masing-masing komponen maka dapat dihitung COP mesin adsorpsi sbb :

$$COP = \frac{Qref}{Q1 + Q2 + Qd3 + Hdes} \qquad (30)$$

3. PERCOBAAN

Percobaan dilakukan dengan menggunakan mesin pendingin dan peralatan pengukuran dan kontrol seperti terlihat pada Gbr. 3. 4 dan 5. Re-generator-adsorber dilengkapi dengan pipa pemanas dari tembaga dan pendinginan dengan ukuran diameter 13.5 mm dan panjang 3.2 m sehingga mempunyai luas permukaan pindah panas menjadi 1.357 m^2. Kondensor diisi pipa tembaga dengan ukuran diameter dan panjang masing-masing, 13.5 mm dan 6 m dengan luas permukaan pindah panas, 2.545 m^2 sedangkan pada evaporator dilengkapi dengan diamater pipa 13.5 mm dan panjang 7 m sehingga luas permukaan pindah panas menjadi 2.97 m^2. Jumlah metanol yang diisi kedalam tabung re-generator adsorber adalah 350 –500 ml dan silika gel dengan jumlah yang cukup untuk menghasilkan konsentrasi sekitar 12% MeOH setelah uji vakum selesai dilaksanakan. Percobaan dimulai dengan mengoperasikan semua sistem pasokan air panas dan dingin ke masing-masing komponen pendingin adsorpsi yaitu ke re-generator-adsorber, kondensor dan ke evaporator. Seperti telah dikemukakan sebelumnya pada saat re-generasi hanya katup yang menguhungkan re-generator-adsorber dengan kondesor yang dibuka untuk mengalirkan uap MeOH ke kondensor, sedangkan pada proses pendinginan atau adsorpsi, katup tadi ditutup begitu juga katup yang menghubungkan evaporator dan kondensor. Uji kinerja alat dilakukan dengan 3 kali percobaan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gbr. 6 menunjukkan suatu contoh perubahan suhu dan tekanan pada proses desorpsi, dimana suhu awal campuran berada pada 30.2 °C. Setelah re-generator adsorber dipanaskan suhu uap mencapai 72.3 °C pada tekanan 23.2 kPa. Suhu kondensor pada saat pemanasan dijaga konstan pada suhu 28 °C. Pada proses adsorpsi suhu re-generator adsorber kembali pada tingkat 30.2 °C yang menghasilkan suhu evaporator pada tingkat 10 °C dan tekanan 5.48 kPa.

Percobaan ke-3 (lihat Gbr.7) dimulai dengan siklus desorpsi, dimana regenerator dipanaskan sampai 73 °C dari tekanan awal 40.7 mmHg (5.4 kPa) menjadi 142.7 mmHg (19 kPa). Pemanasan dilakukan selama 1.5 jam. Setelah itu dilanjutkan dengan siklus adsorsi, dimana suhu evaporator awal sebesar 28 °C berubah menjadi -3 °C dan meningkat sampai 10 °C. Sistem bisa mempertahankan suhu evaporator pada 10 °C selama 2.5 jam.

Untuk mengetahui besarnya energi yang dipasok dari sumber pemanas dan yang diambil dari kondensor, adsorber serta evaporator, diperlukan perubahan entalpi air pemanas, air pendingin dari menara pendingin serta air dingin di evaporator dengan mengukur laju aliran serta perubahan suhu masuk dan keluar dari masing-masing komponen mesin adsorpi.
Besarnya perubahan entalpi tsb. Dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$q = \dot{m}.Cp.\, dT \qquad (31)$$

maka diperoleh hasil sebagai berikut :
dimana :

q = pertukaran panas (kW)
Cp = Panas jenis (kJ/kg.°K)
dT = Beda suhu masuk dan keluar daro masing-masing komponen. (°K)
m = Kecepatan aliran (kg/detik)

Dari hasil percobaan dapat dihitung kinerja alat dengan menggunakan persamaan termodinamika yang telah diuraikan secara panjang lebar oleh pers. (1) sampai dengan pers. (30). Hasil pengukuran perubahan entalpi dari air pemanas dan pendingin serta air dingin dari evaporator dapat dilihat pada Tabel 2. Data pengukuran ini ternyata tidak jauh berbeda dengan perhitungan termodinamika seperti dicantumkan pada Tabel 3. Dalam Tabel 3 didapatkan nilai COP mesin adsorpsi yang dibuat sebesar 0.17 walaupun masih lebih rendah dibandingkan hasil percobaan Oertel, K and M. Fischer (1997) yang mencapai nilai 0,3.

4.1. Laju Penguapan

Dari hasil pengamatan, diperoleh data laju perubahan ratio massa antara jumlah adsorbat dengan jumlah adsorber seperti dapat terlihat pada Gbr. 8. Dari Gbr.8 tsb. Dapat dihitung koefisien pindah massa, D berdasarkan persamaan difusi Fick untuk lapisan tipis berbentuk lempeng semi tak berhingga (Henderson dan Perry, 1976, Birds, dkk., 1960).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 (DM) \qquad (32)$$

Pemecahan untuk pers.(32) untuk kondisi awal dan kondisi batas tertentu didapatkan hubungan sbb:

$$\frac{M - Me}{Mo - Me} = \frac{8}{\pi^2}\left(e^{-D.\theta.\frac{\pi^2}{4b^2}} + \frac{1}{9} e^{-9.D.\theta.\frac{\pi^2}{4b^2}} + \frac{1}{25} e^{-25D.\theta.\frac{\pi^2}{4b^2}} + \ldots \right) \qquad (33)$$

dimana :

b	=	tebal lempeng (m)
M	=	kadar konsentrasi pada waktu t (%bk)
Me	=	kadar konsentrasi kesetimbangan (%bk)
Mo	=	kadar konsentrasi awal (%bk)
D	=	difusivitas bahan (m^2/s)
θ	=	waktu (detik)

Dengan menggunakan metoda perbedaan kuadrat terkecil, secara simultan nilai dari parameter pers. (34) untuk nilai konsentrasi awal, Mo = 0.119 dapat ditentukan sbb.
Me = 0.006, D = 0.00018354 (m^2/s).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

1) Telah berhasil dirancang bangun suatu prototipe mesin pendingin adsorpsii dengan kombinasi silica-gel dan MeOH.
2) Hasil pengukuran kebutuhan energi untuk masing-masing komponen mesin didapatkan data masing-masing untuk a). Panas generasi qg= 892.11 W,b). Panas kondensasi, qc=164.86 W, c). Panas adsorpsi, qad= 864.63 W, dan e). Panas evaporasi, qe= 148.4 W. dan nilai COP=0.17. Hasil pengukuran ini tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan termodinamika.
3) Dengan suhu re-generator yang diperlukan untuk operasi berada dibawah suhu 100 °C untuk menghasilkan suhu pendingin -3°C, maka dalam prakteknya panas dapat dipasok dari kolektor surya, tangki air panas yang dipanaskan dengan tungku biomassa atau dengan kompor gas. Suhu evaporator yang tercapai tsb. Cukup untuk digunakan pada fasilitas pendingin sayur-sayuran tropis termasuk produk dari Negara dingin seperti kol, brokoli, lobak, wortel, strawberry dll.

UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan hasil dari penelitian yang dibiayai Osaka Gas Foundation of International Cultural Exchange (OGFICE). Penulis sangat menghargai bantuan ini yang telah membantu terlaksananya penelitian dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada PPLH-IPB yang telah memberikan informasi mengenai program hibah dari OGFICE ini.

KEPUSTAKAAN

Birds, R.B, W.E. Steward and E.N. Lightfoot (1960), *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Guilleminot, J.J., et al. Presentation of Some Adsorption Units Developed for Solar Refrigeration.

Henderson, S.M. and Perry, 1976. Agricultural Process Engineering, AVI.

Kamaruddin, A. 1997. *Prospect of the Utilization of Renewable Energy Sources for Cool Storage of Tropical Fruits*, J. International Society of Southeast Asian Agricultural Sciences, Vol.3, pp.12-26.

Kamaruddin, A.., 2000. Sistim Pendinginan dengan Metode Radiasi dan Absorpsi serta Kemungkinan Penerapannya di Indonesia, Seminar Perteta, Bogor

Lunde. 1980. Solar Thermal Engineering. John Wiley and Sons, New York.

McVeigh, J.C., 1984. *Solar Cooling and Refrigeration*. UNESCO, Paris, France. Ambient Press Ltd. Po Box 25, Loughborough, UK.

Oertel,K and M. Fischer, 1997. Adsorption cooling system for cold storage using methanol /silica gel. Paper presented in Heat Powered Cycles'97, Nottingham.

Perrich, J.R. Activated Carbon Adsorption for Wastewater Treatment. 1988. CRC Press, Bocaraton.

Pons.M, 1997. Global analysis of refrigerative adsorption cycles with thermal refrigeration (non-uniform temperature). Int.J. Refrigeration, Vol.20, No.6, pp.411-420.

Pons, M. and Kodama, A. Second Law Analysis of the Open Cycles for Solid Desiccant Air Conditioners. http://www.limsi.fr/individu/mpons.

Pons, M. Experimental Study of Adsorption Cycles with Thermal Regeneration ("Temperature Fronts"). http://www.limsi.fr/individu/mpons.

Pons, M. Thermodynamic Analysis of Adsorption Cycles Operated with Heat-Regeneration. http://www.limsi.fr/individu/mpons.

Prasetyo, B.T., Boussehain, R dan Feidt, M. 1987. Pemanfaatan Panas Gas Buang sebagai Sumber Energi Mesin Pendingin Adsorpsi dengan Refrigeran Alkohol. Seminar Energi National V.

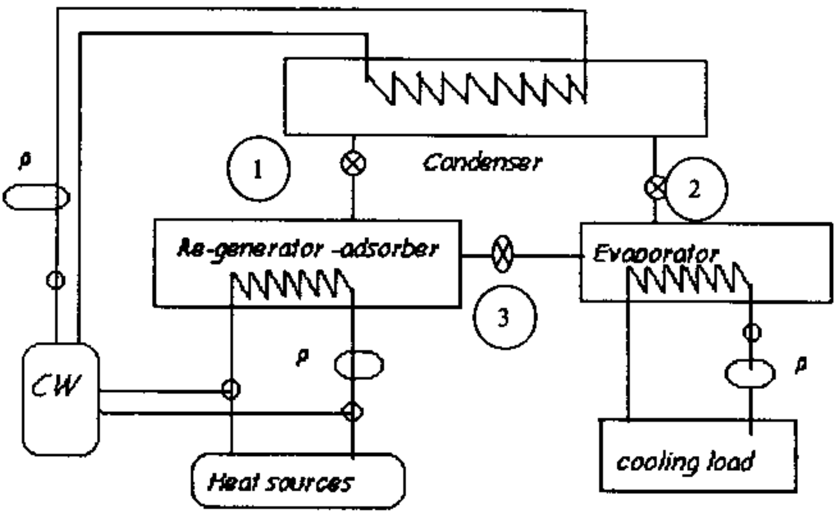
Saha,B.B. , A. Akisawa and T.Kashiwangi, 1997.Silica gel –water advanced adsorption refrigeration cycle, Energy, Vol.22, No.4, pp.437-447.

Szarzynski,S., Y. Feng and M. Pons, 1997. Study of Different internal vapor transports for adsorption cycles with heat regeneration, Int .J. Refrigeration, Vol.20, No.6, pp.390-401.

Tangkengsirisin, V.et al. 1998. A Solar-Powered Adsorption Cooling System using a Silica Gel-Water Mixture. *Energy*. Vol. 23. No. 5. Pp. 347-353. Pergamon Elsevier Science Ltd. Printed in Great Britain.

Teng, Y. ,R.Z. Wang and J.Y. Wu, 1997. Study on the fundamentals of adsorption systems, Applied Thermal Engineering, Vol. 17, No.4. pp.327-338.

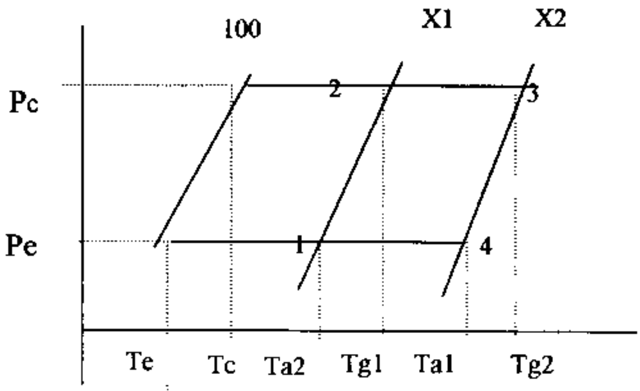
LAMPIRAN



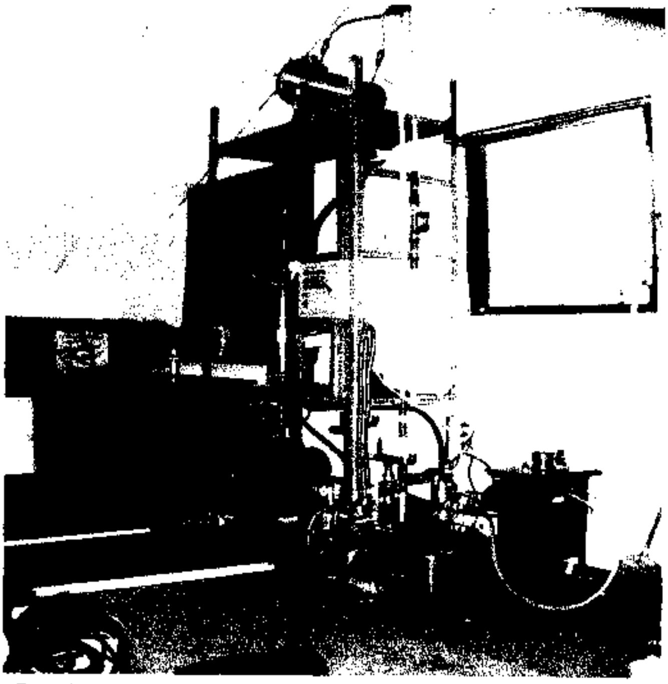
p re-circulation pump

CW-cooling water

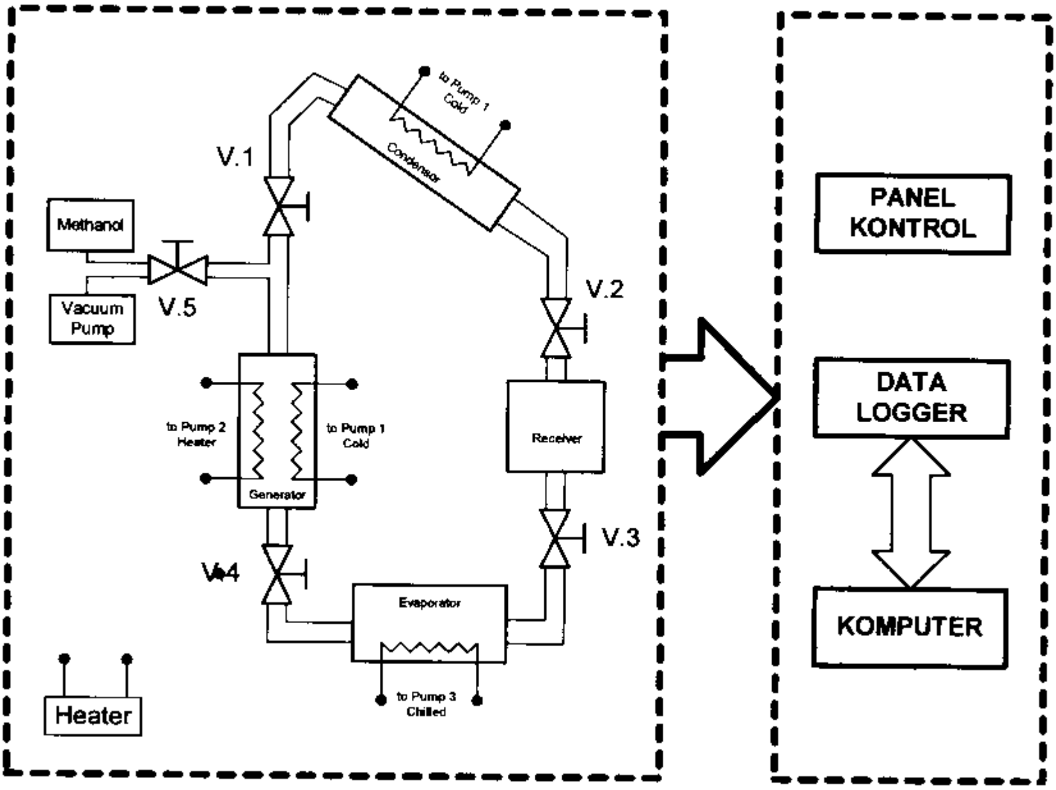
Gambar 1. Sistem pendingin adsorpsi



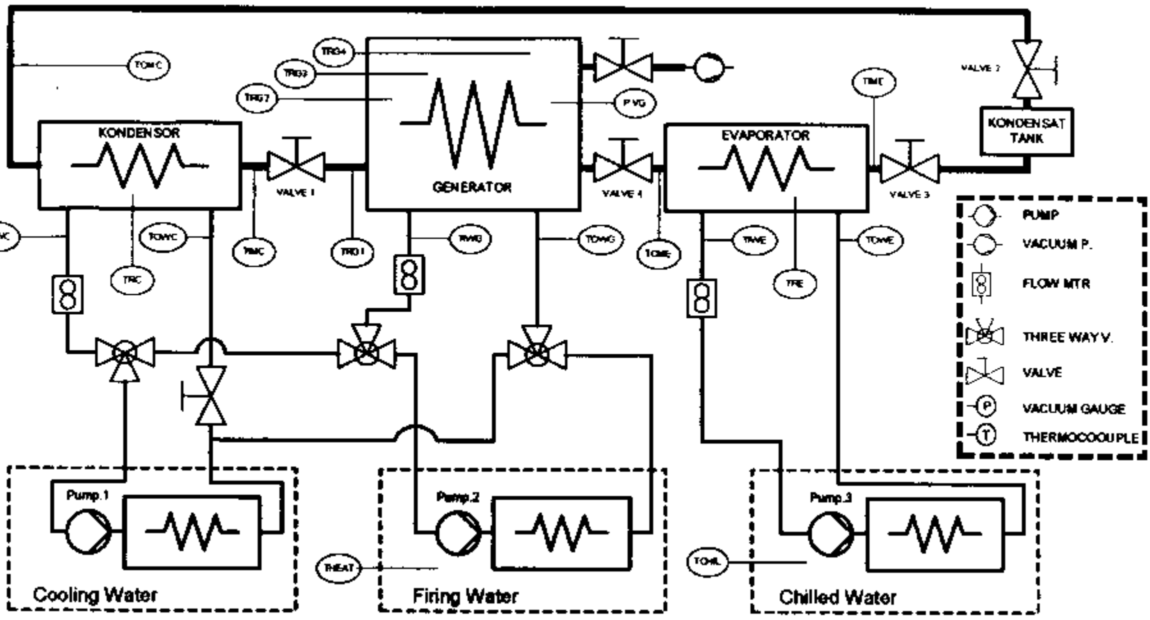
Gambar 2. Siklus pendinginan sistem adsorpsi



Gambar 3. Foto menunjukkan peralatan percobaan



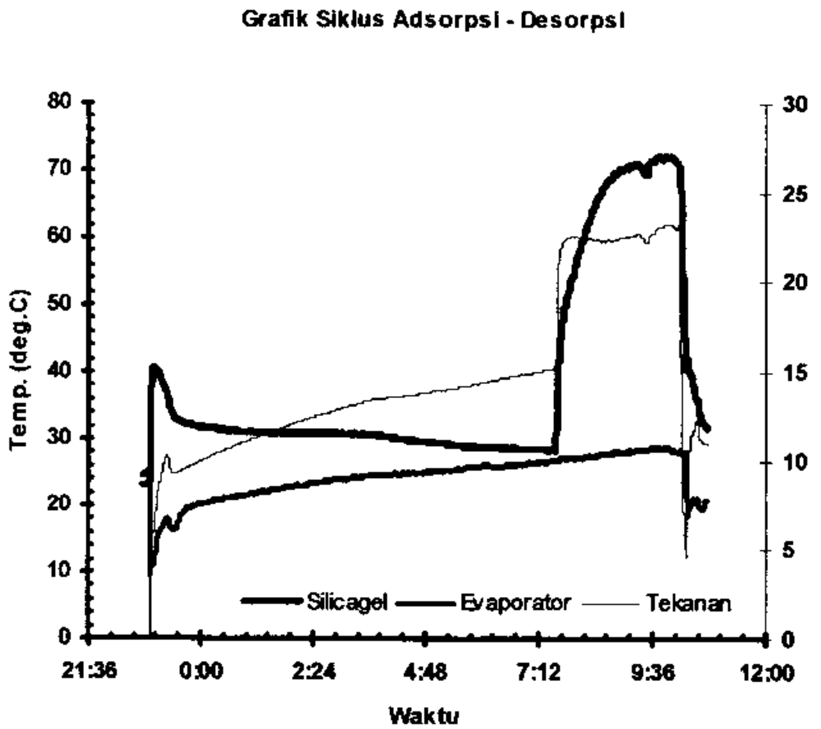
Gambar 4. Diagram skematis sistem pemanasan dan pendinginan serta peralatan untuk pengukuran



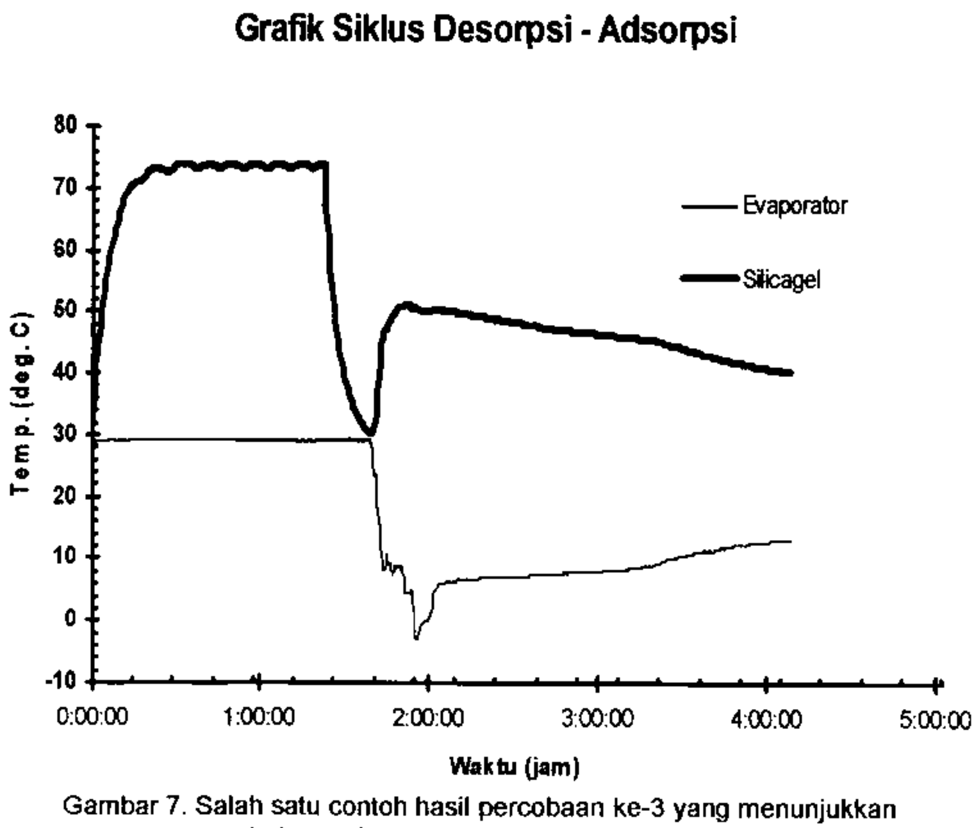
Gambar 5. Diagram skematis lokasi pengukuran suhu dan tekanan.

Keterangan :

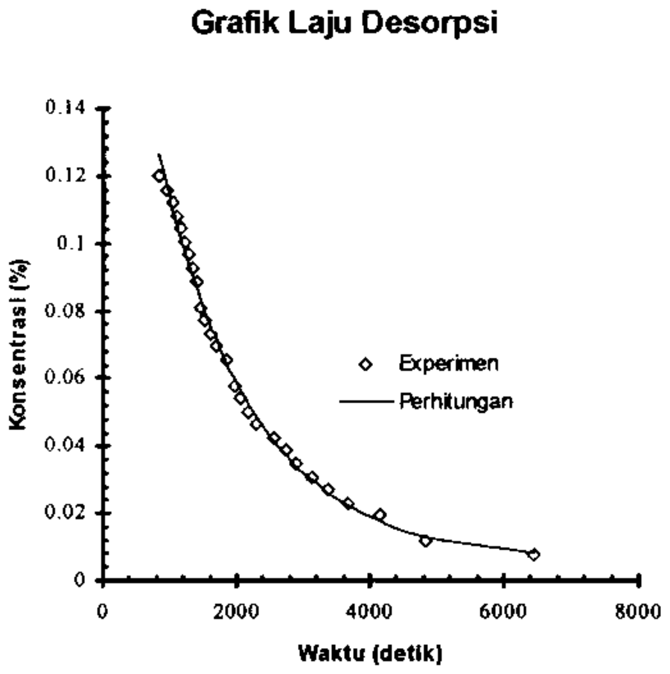
TIWC	: T. input water condensor	TRG2	: T. Ruang Generator 2
TOWC	: T. output water condensor	TRG3	: T. Ruang Generator 3
TRC	: T. Ruang Condensor	TRG4	: T. Ruang Generator 4
TIWE	: T. input water evaporator	TIMC	: T. input Methanol Condensor
TOWE	: T. output water evaporator	TOMC	:T. input Methanol Condensor
TRE	: T. Ruang Evaporator	TIME	: T. input Methanol Evaporator
TIWG	: T. input water generator	TOME	: T. input Methanol Evaporator
TOWG	: T. output water generator	P.VG	: Tekanan Vacuum Gauge
TRCH	: T. Ruang Chiller		
THEAT	: T. Heater		
TRG1	: T. Ruang Generator 1		



Gambar 6. Contoh hasil pengukuran suhu dan tekanan pada percobaan pertama



Gambar 7. Salah satu contoh hasil percobaan ke-3 yang menunjukkan perubahan suku pada re-generator adsorber dan suhu pada evaporator.



Gambar 8. Perubahan konsentrasi silica gel-MeOH pada saat desorpsi.

Tabel 1. Data dasar system pendingin adsorpsi (Oertel dan Fisher, 1997)

Parameter	Nilai
1. Suhu evaporator Te	-2 °C
2. Suhu generator,Tg	85 °C
3. Suhu condenser	30 °C
4. Kapasitas pendinginan	20W/kg
5. Panas laten MeOH pada tekanan 0.1 bar=75 Torr: a. Penguapan b. Adsorpsi pada konsentrasi X=8%	 1200 kJ/kg 1680 kJ/kg
6. COP actual	0.3

Tabel 2. Perhitungan kesetimbangan energi berdasarkan perubahan suhu air yang dialirkan ke masing-masing komponen

	m (kg/det)	Cp (kJ/kg. K)	dT (deg. K)	q (Watt)
Evaporator	0.02087	4.183	1.7	**148.37**
Generator	0.10156	4.183	2.1	**892.11**
Kondensor	0.05971	4.183	0.66	**164.86**
Adsorpsi	0.15900	4.183	1.3	**864.63**

Tabel 3. Hasil perhitungan keseimbangan energi berdasarkan persamaan termodinamika.

Program Simulasi

Suhu awal generator Ta2 (K)	303.15	Proses pendinginan (J)	157.11
Suhu kondensor Tc (K)	302.15	Panas generator (J)	1574762.2
Suhu Evaporator Tev (K)	283.15	Panas kondensor (J)	287627.8
Massa silica gel (kg)	2.034	Panas adsorpsi (J)	1640850.3
Suhu akhir generasi Tg2 (K)	348.15	Panas refrigerasi (J)	259241.4
Methanol yang dibutuhkan (kg)	0.3932	Kecepatan adsorpsi	0.0000105
Konsentrasi awal X1	0.193	Waktu adsorpsi (dtk)	1771
Konsentrasi akhir X2	0.007	Kecepatan desorpsi	0.0000105
Suhu Tg1 titik 2 (K)	308.65440	Waktu desorpsi (dtk)	1771
Suhu Ta1 titik 4 (K)	323.16620	Daya refrigerasi (watt)	146.3
panas adsorpsi, Ha (J)	1007755.7	Daya adsorpsi (watt)	873.09
panas desorpsi, Hd (J)	941824.7	Daya kondensor (watt)	162.4
Panas sensibel adsorben (J)	84573.7	Daya generasi (watt)	889.19
Panas sensibel generator (J)	531000	Balance	0
Panas sensibel refrigeran (J)	17363.8	COP	0.1646