

## STUDI EKSPERIMENTAL PENDINGIN ADSORPSI ZEOLIT-AIR

Wibowo Kusbandono dan FA. Rusdi Sambada

Jurusan Teknik Mesin  
Universitas Sanata Dharma  
Kampus 3 Paingan Maguwaharjo Sleman  
Jogjakarta, Indonesia  
Phone: +62-0274-883037,  
E-mail: [kusbowo@yahoo.co.id](mailto:kusbowo@yahoo.co.id) dan [rusdisambada@yahoo.co.id](mailto:rusdisambada@yahoo.co.id)

### ABSTRACT

*In developing countries there is a growing interest in refrigeration for food preservation. The aim of this research is to evaluate performance of a solar adsorption refrigerator using water and zeolite.*

*First, a laboratory apparatus was constructed. The water vapor in the evaporator is adsorbed by zeolite and the water cools down. The zeolite is located in a vacuum tube solar collector which can be heated by artificial sunlight. In doing so, the water is desorbed and condenses at ambient temperature. After the collector cools down the cooling process can start again. This process was investigated with different mass of zeolite and water. Several data have been collected to evaluate the refrigerator's performance, such as the temperatures in several points of the components, the total incident solar radiation and the ambient air temperature.*

*Typical results are: the water temperature reached 22°C with a corresponding coefficient of performance (COP) of 0.056.*

*Keywords: solar refrigerators, water, zeolite, adsorption, COP*

### Daftar Arti dan Lambang

A	: luasan perpindahan panas kondensor ( $m^2$ )
$C_{pm}$	: panas jenis tabung zeolit ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$C_{pZ}$	: panas jenis zeolit ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$C_w$	: panas jenis air ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$dM_w$	: jumlah air yang terdesorpsi (kg)
$dM_{wi}$	: jumlah air terdesorpsi saat ini (kg)
$dT_m$	: log mean temperature difference ( $^\circ C$ )
L	: panas laten air ( $kJ/kg$ )
$M_m$	: massa tabung zeolit (kg)
$M_{w,RE}$	: massa air yang teradsorpsi (kg)
$M_Z$	: massa zeolit (kg)
$Q_{ad}$	: panas untuk desorpsi air ( $kJ/h$ )
$Q_i$	: jumlah energi surya yang diterima selama pengukuran ( $kJ/h$ )
$T_{CO1}$	: pengukuran temperatur air masuk kondensor ( $^\circ C$ )
$T_{CO2}$	: pengukuran temperatur air keluar kondensor ( $^\circ C$ )
$T_a$	: pengukuran temperatur sekitar kondensor ( $^\circ C$ )
$T_{Z,i}$	: temperatur zeolit saat ini ( $^\circ C$ )
$T_{Z,i-1}$	: temperatur zeolit pada pengukuran sebelumnya ( $^\circ C$ )
$X_i$	: kandungan air dalam zeolit saat ini (%)

$X_{i-1}$	: kandungan air dalam zeolit pada pengukuran sebelumnya (%)
$X_m$	: kandungan air dalam zeolit rata-rata (%) = $(X_i + X_{i-1})/2$
$\Delta H$	: panas laten desorpsi ( $kJ/kg$ ), untuk zeolit-air
$\Delta H$	: 2788,7 $kJ/kg$
$\Delta t$	: lama waktu pengukuran sebelumnya sampai saat ini (jam)

### 1. Pendahuluan

Di negara-negara berkembang seperti Indonesia, khususnya di daerah terpencil, kebutuhan akan sistem pendingin untuk pengawetan/ penyimpanan bahan makanan dirasakan semakin meningkat sementara sistem pendinginan konvensional yang ada belum tentu bisa dipakai karena tidak semua daerah terpencil memiliki jaringan listrik sehingga pendingin tenaga surya sederhana yang dapat bekerja tanpa adanya jaringan listrik merupakan alternatif pemecahan permasalahan kebutuhan sistem pendingin di daerah terpencil seperti ini.

Salah satu teknik pemanfaatan energi surya untuk sistem pendinginan adalah sistem kompresi uap yang digerakkan oleh tenaga listrik yang dihasilkan sel surya, tetapi investasi sel surya terlalu mahal untuk masyarakat, disamping itu dibutuhkan teknologi tinggi untuk



membuat dan merawat peralatan sel surya yang bagi negara-negara berkembang merupakan masalah tersendiri. Disain pendingin surya untuk negara-negara berkembang haruslah sederhana dan mudah perawatannya dengan kata lain harus dapat dibuat dan diperbaiki oleh industri lokal. Teknik pemanfaatan yang lain adalah sistem adsorpsi, sistem ini digerakkan oleh energi termal temperatur rendah yang mudah didapatkan dengan sebuah kolektor surya. Teknologi kolektor surya jauh lebih sederhana dibandingkan dengan teknologi sel surya dan umumnya dapat dibuat dan diperbaiki di industri lokal. Selain kolektor sebagai salah satu komponen utamanya sistem pendingin adsorpsi membutuhkan bahan refrijeran dan adsorber. Dalam beberapa tahun terakhir penggunaan air sebagai refrijeran dan zeolit sebagai adsorber berhasil dikembangkan untuk membuat pendingin adsorpsi surya sederhana dengan biaya yang tidak mahal tetapi dapat menghasilkan pendinginan tanpa polusi. Selain tidak mahal air dan zeolit merupakan bahan refrijeran dan adsorber yang ramah lingkungan.

Salah satu faktor penentu unjuk kerja suatu sistem pendingin adsorpsi surya adalah sifat adsorbernya (dalam hal ini sifat zeolit). Sifat zeolit ditentukan oleh komposisi kimia, ukuran, konduktifitas termal, dan sebagainya. Sifat-sifat zeolit tersebut umumnya tergantung dari kualitas bahan baku dan proses pembuatannya di pabrik, dan umumnya zeolit yang beredar di pasaran seperti yang banyak beredar di Yogyakarta tidak mempunyai data spesifikasi ini. Sifat-sifat adsorber akan menentukan kapasitas pendinginan yang dapat dihasilkan dan menentukan unjuk kerja sistem pendingin secara keseluruhan. Selain kurangnya data spesifikasi zeolit yang beredar di pasaran lokal, tulisan mengenai unjuk kerja sistem pendingin adsorpsi yang menggunakan zeolit yang banyak beredar dipasaran lokalpun belum banyak ditemui.

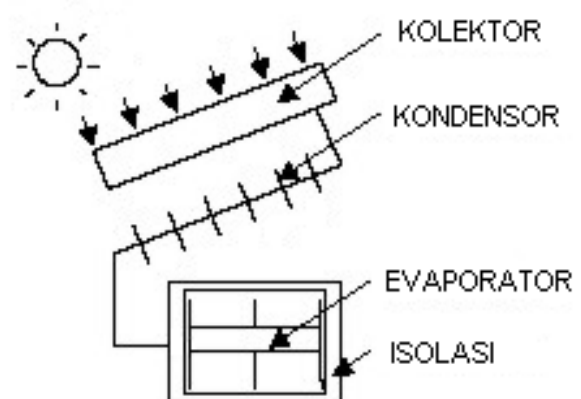
Tujuan yang ingin dicapai adalah menajagi kemungkinan penggunaan zeolit yang dijual di pasar lokal khususnya di Yogyakarta untuk dipakai pada pendingin adsorpsi energi surya, mengetahui koefisien unjuk kerja (COP) yang dihasilkan dan membuat model pendingin adsorpsi energi surya

Beberapa penelitian pendingin adsorpsi zeolit-air dengan energi surya yang pernah dilakukan diantaranya mendapatkan bahwa harga COP sistem pendingin adsorpsi surya menggunakan zeolit-air akan mendekati konstan pada temperatur pemanasan  $160^{\circ}\text{C}$  atau lebih[1]. Sebuah penelitian adsorpsi melakukan eksperimen sistem pendingin adsorpsi surya menggunakan zeolit-air dan mendapatkan harga COP sebesar 0,12[2]. [3]Peneliti lain meneliti pendingin adsorpsi zeolit-air tetapi COP nya hanya 0,1. [4] Penelitian pada sistem pendingin adsorpsi surya menggunakan zeolit-air dengan kolektor plat datar dan kondensor berpendingin udara mendapatkan COP yang rendah sebesar 0,054 modifikasi yang dilakukan dengan

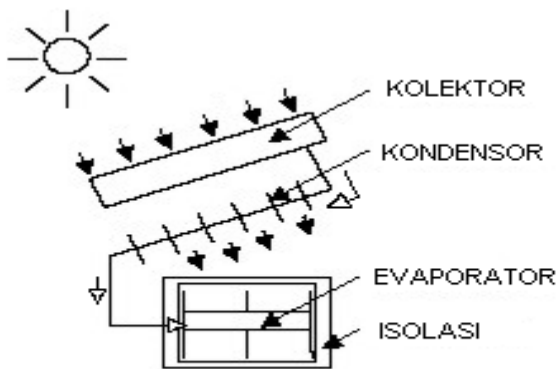
memvakumkan sistem dan penggunaan reflektor datar tidak banyak menaikkan harga COP.[5] Penelitian yang lain dengan melakukan pemanasan  $150^{\circ}\text{C}$  didapatkan energi pendinginan sebesar 250 kJ per kilogram zeolit. Sebuah penyimpan dengan volume 125 L dapat didinginkan menggunakan kolektor dengan luas  $3\text{ m}^2$ . Sedangkan nilai COP sebesar 0,25 dengan menggunakan kolektor parabola secara terpisah dari sistem pendingin sehingga setiap kali diperlukan proses pemvakuman[6]. Sistem yang dipakai Ramos tidak menggunakan kondensor, Ramos juga mendapatkan kapasitas adsorpsi zeolit mencapai optimal dengan pemanasan tabung zeolit sebesar  $250^{\circ}\text{C}$ . Penelitian-penelitian tersebut menggunakan zeolit yang diproduksi di Jerman, Slovnaft-Czech, dan Perancis

## **2. Metode Penelitian**

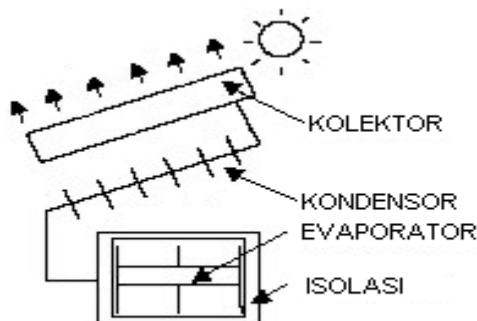
Siklus pendinginan adsorpsi terdiri dari proses adsorpsi (penyerapan) refrijeran (air) kedalam adsorber (zeolit) daya penyerapannya sampai 25% (kg air / kg zeolit) dan proses pelepasan refrijeran dari adsorber (proses desorpsi). Gambar 1.a. sampai dengan 1.d memperlihatkan sistem pendingin adsorpsi surya yang terdiri dari sebuah kolektor surya, sebuah kondensor dan sebuah evaporator yang diletakkan dalam kotak pendingin berisolasi. Zeolit diletakkan di dalam kolektor dan air pada mulanya ada di dalam evaporator. Sepanjang pagi sampai menjelang sore energi surya memanasi kolektor sehingga kolektor menjadi panas sekitar  $100 - 200^{\circ}\text{C}$  (gambar 1.a), air yang sebelumnya terserap dalam zeolit juga menjadi panas hingga menguap dan dilepaskan oleh zeolit, uap air mengembun di kondensor dan masuk dalam evaporator (Gambar 1.b).



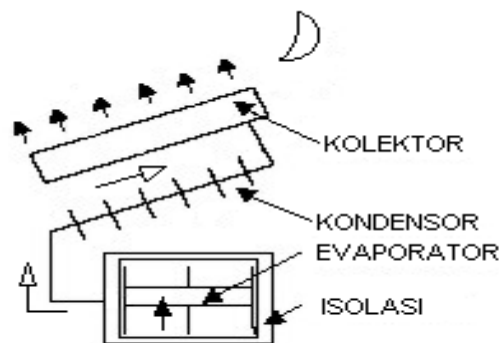
**Gambar 1.a. Proses pemanasan kolektor pada pendingin adsorpsi surya**



Gambar 1.b. Proses desorpsi pada pendingin adsorpsi surya



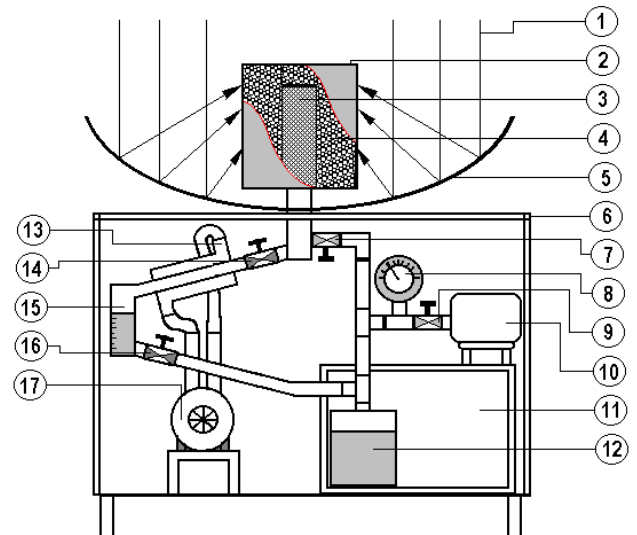
Gambar 1.c. Proses pendinginan kolektor pada pendingin adsorpsi surya



Gambar 1.d. Proses adsorpsi pada pendingin adsorpsi surya

Pada malam hari temperatur kolektor turun sampai ke temperatur sekitar (gambar 1.c) dan zeolit menyerap uap air dari evaporator, air dalam evaporator menguap dan menyerap panas dari beban pendinginan (bahan makanan, vaksin dsb) dalam kotak pendingin (gambar 1.d). Karena adsorpsi adalah proses pelepasan panas maka kolektor harus dapat didinginkan secara efisien pada malam hari. Dari penjelasan di atas proses pendinginan berlangsung secara *intermitten* (hanya pada

malam hari) agar sistem dapat menghasilkan efek pendinginan secara kontinyu maka dipakai dua buah kolektor, jika yang satu melaksanakan proses adsorpsi maka yang lain melaksanakan proses desorpsi. Skema alat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2 :



Gambar 2. Skema peralatan/model penelitian

Keterangan skema :

1. Simulasi radiasi surya (lampu halogen)
2. Tabung zeolit
3. Pipa berlubang (saluran uap air)
4. Zeolit
5. Kolektor parabola (plat aluminium)
6. Rangka pendukung
7. Katup 1
8. Manometer
10. Pompa vakum
11. Kotak pendingin
12. Evaporator
13. Kondensor
14. Katup 3
15. Penampung air
16. Katup 4
17. Pompa air

Variabel yang divariasikan adalah massa zeolit di tabung  $M_z$  (kg), divariasi 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; dan 2,0 kg; massa air di evaporator,  $M_w$  (kg), divariasi 0,1; 0,2; 0,3; 0,4, dan 0,5 kg; energi radiasi surya,  $Q_i$  (kJ/h), divariasi 300, 450, 600, 750, dan 900 W. Variabel yang diukur adalah temperatur sekitar kondensor,  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatur air dalam evaporator,  $T_e$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatur air masuk kondensor,  $T_{CO1}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatur air keluar kondensor,  $T_{CO2}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatur zeolit dalam tabung zeolit,  $T_z$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), massa air yang terdesorpsi,  $dM_w$  (kg), massa air yang teradsorpsi,  $M_{w,RE}$  (kg) dan energi radiasi surya

yang diterima,  $Q_i$  (kJ/h).

Pada variasi massa zeolit, massa air yang digunakan sebanyak 0,2 kg dan pemanasan rata-rata 600 w. Pada variasi massa air, massa zeolit yang digunakan sebanyak 0,4 kg dan pemanasan rata-rata 600 w. Variasi pemanasan dilakukan dengan menggunakan massa zeolit sebanyak 0,4 kg dicampur air sebanyak 0,15 kg (air terserap seluruhnya 300 sampai dengan 900 watt dengan kenaikan 150 watt. Pada penelitian ini energi surya disimulasikan dengan menggunakan lampu halogen.

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut :

Temperatur kondensasi ( $T_{CO}$ ) dihitung dengan persamaan :

$$T_{CO} = (T_{CO1} + T_{CO2}) / 2 \quad (1)$$

Kandungan air dalam zeolit,  $X$  (%) dihitung dengan persamaan :

$$X_i = (X_{i-1} \times M_Z / 100 + dM_{Wi}) / M_Z \times 100 \quad (2)$$

Perubahan kandungan air dalam zeolit,  $dX$  (%) : selisih kandungan air dalam zeolit saat ini dengan pengukuran sebelumnya :

$$dX = X_i - X_{i-1} \quad (3)$$

Panas sensibel tabung zeolit dan zeolit,  $Q_{m,Z}$  (kJ/h) :

$$Q_{m,Z} = (M_m \times C_{Pm} + M_Z \times C_{PZ}) \times (T_{Z,i} - T_{Z,i-1}) / \Delta t \quad (4)$$

Panas sensibel air yang berada dalam zeolit,  $Q_W$  (kJ/h) :

$$Q_W = (M_Z \times X_m \times C_W) \times (T_{Z,i} - T_{Z,i-1}) / \Delta t \quad (5)$$

Panas untuk desorpsi air,  $Q_{ad}$  (kJ/h) :

$$Q_{ad} = dM_W \times \Delta H / \Delta t \quad (6)$$

Energi surya berguna,  $Q_C$  (kJ/h) :

$$Q_C = Q_{m,Z} + Q_W + Q_{ad} \quad (7)$$

Efisiensi kolektor selama waktu  $\Delta t$ ,  $\eta_C$  :

$$\eta_C = (Q_C / Q_i) \times 100 \% \quad (8)$$

Koefisien perpindahan panas kondensor,  $U$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) :

$$U = Q_{ad} / (dT_m \times A) \quad (9)$$

$dT_m$  ( $^\circ C$ ) dihitung dengan persamaan :

$$dT_m = (T_{CO,i} - T_{CO,o}) / \ln [(T_{CO,i} - T_a) / (T_{CO,o} - T_a)] \quad (10)$$

Total energi pendinginan,  $Q_L$  (kJ) :

$$Q_L = M_{W,RE} \times L \quad (11)$$

Unjuk kerja siklus,  $COP_C$  :

$$COP_C = Q_L / Q_C \quad (12)$$

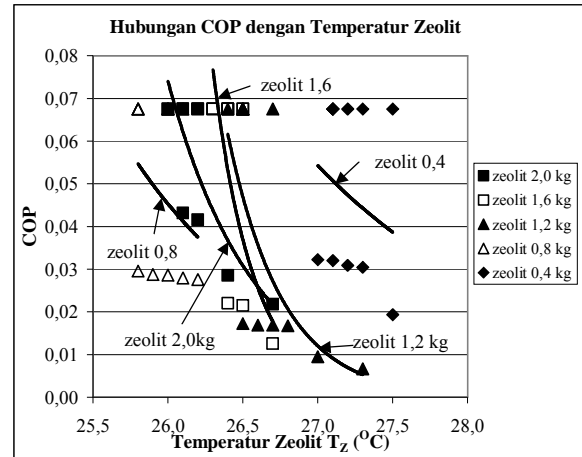
Unjuk kerja solar,  $COP_S$  :

$$COP_S = Q_L / Q_i \quad (13)$$

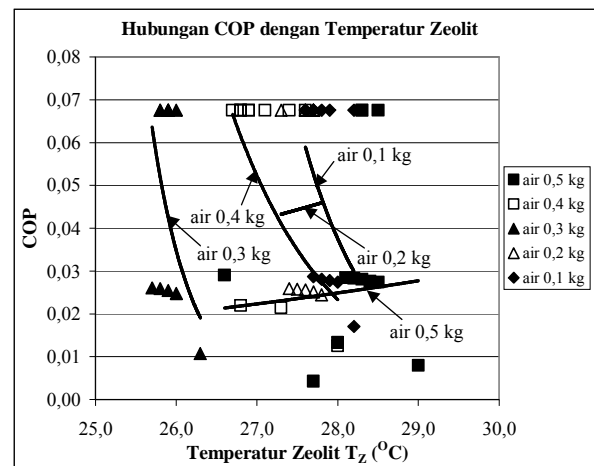
### 3. Hasil Penelitian Dan Pembahasan

Hubungan COP dengan temperatur zeolit menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur zeolit maka unjuk kerja yang dihasilkan semakin menurun. Hal ini disebabkan semakin tinggi temperatur zeolit maka kemampuan adsorpsinya semakin rendah, maka pada proses adsorpsi sebaiknya zeolit didinginkan agar penyerapan uap air dapat tetap berlangsung dengan baik. Semakin banyak uap air yang terserap zeolit maka semakin tinggi temperatur zeolit yang terjadi, untuk itu

perbandingan massa air dengan massa zeolit tidak boleh terlalu besar. Jika perbandingan massa air dengan zeolit terlalu besar maka temperatur zeolit lebih cepat naik dan zeolit lebih cepat jenuh (gambar 3 dan 4)



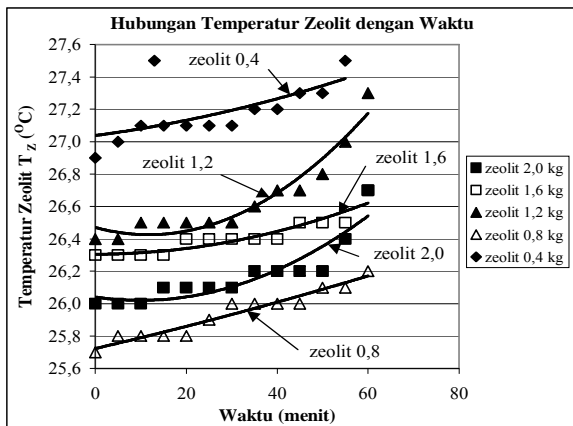
Gambar 3. COP dengan variasi massa zeolit



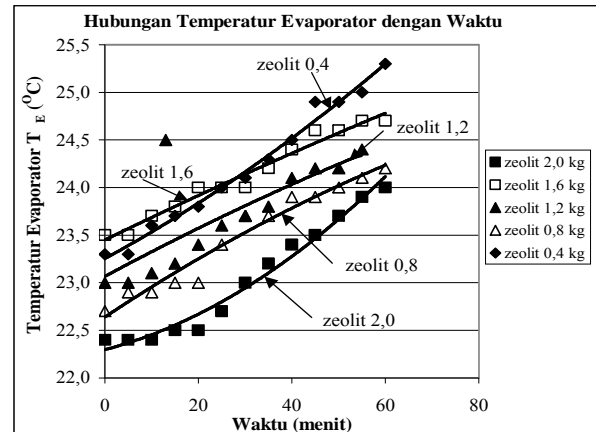
Gambar 4. COP dengan variasi massa air

Hubungan temperatur zeolit dengan waktu menunjukkan semakin lama temperatur zeolit semakin naik. Hal ini disebabkan semakin lama uap air yang terserap semakin banyak sehingga temperatur zeolit semakin tinggi. Temperatur yang terjadi akan semakin tinggi untuk perbandingan massa air dengan massa zeolit yang semakin besar (Gambar 5 dan 6).

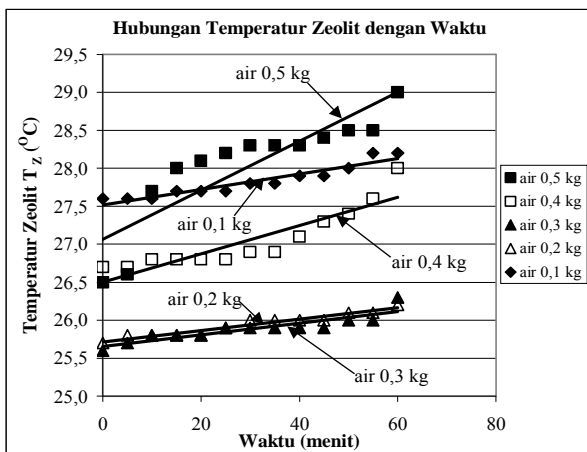




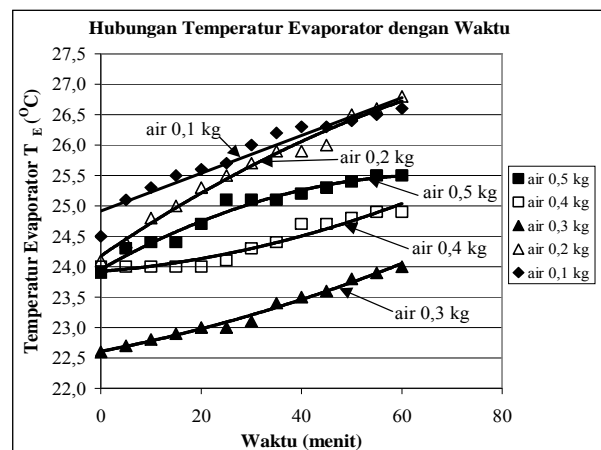
Gambar 5. Temperatur zeolit dengan variasi massa zeolit



Gambar 7. Temperatur evaporator dengan variasi massa zeolit



Gambar 6. Temperatur zeolit dengan variasi massa air



Gambar 8. Temperatur evaporator dengan variasi massa air

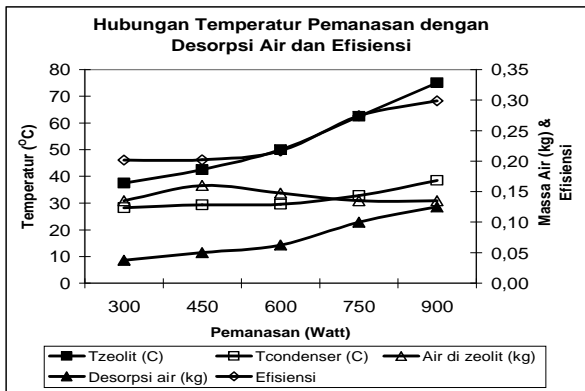
Hubungan temperatur evaporator dengan waktu menunjukkan bahwa temperatur evaporator semakin lama semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena dengan berjalannya waktu evaporator menyerap panas dari lingkungan semakin banyak. Bertambahnya temperatur evaporator bergantung pada beberapa hal diantaranya temperatur sekitar, massa air dalam evaporator dan massa zeolit dalam sistem. Semakin tinggi temperatur sekitar, semakin sedikit massa air dalam evaporator dan semakin sedikit massa zeolit maka temperatur evaporator semakin cepat naik (gambar 7 dan 8)

Hubungan temperatur pemanasan dengan temperatur zeolit menunjukkan semakin besar pemanasan yang terjadi temperatur zeolit yang terjadi. Semakin tinggi temperatur zeolit semakin banyak pula uap air yang terdesorpsi sehingga temperatur kondensor semakin tinggi. Jika uap air yang terdesorpsi semakin banyak maka efisiensi sistem pun makin baik (Gambar 9)

Secara umum hasil dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

Temperatur air dalam evaporator tidak mencapai temperatur dingin seperti yang diharapkan (hanya turun beberapa derajat). Hal ini dapat disebabkan karena tingkat kevakuman yang kurang, hal ini berkaitan dengan kemampuan pompa vakum dan adanya kebocoran pada sistem. Kevakuman yang kurang menyebabkan air tidak dapat menguap secara maksimal dan kebocoran sistem menyebabkan titik didih air yang semakin lama semakin tinggi sehingga air yang pernah digunakan seolah-olah tidak dapat digunakan lagi (sulit untuk mendidih pada temperatur rendah).





Gambar 9. Hubungan temperatur pemanasan dengan desorpsi air dan efisiensi

Bahan zeolit yang digunakan tidak dapat menyerap uap air dengan baik, hal ini berkaitan dengan jenis bahan zeolit yang ada di pasaran umumnya mempunyai ukuran butiran dan keporusan yang besar. Kemampuan bahan zeolit yang kurang dalam menyerap uap air (melakukan proses adsorpsi) terlihat dari tekanan sistim yang relatif tetap, seharusnya tekanan sistim turun selama proses adsorpsi. Kemampuan bahan zeolit yang kurang dalam menyerap uap air juga menyebabkan titik didih air dalam evaporator yang semakin tinggi karena uap air yang tidak terserap akan menaikkan tekanan sistim sehingga menaikkan titik didih air dalam evaporator.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain :

1. COP yang dapat dicapai sebesar 0,056 dan temperatur evaporator  $22^{\circ}\text{C}$  keduanya terjadi pada variasi massa zeolit 2 kg dan massa air 0,2 kg
2. Temperatur zeolit pada proses adsorpsi harus didinginkan sebaik mungkin agar proses adsorpsi dapat berjalan dengan baik
3. Tempat zeolit harus terbuat dari bahan dengan konduktivitas termal yang baik agar proses desorpsi dapat berjalan dengan baik.
4. Perbandingan massa air dengan zeolit tidak boleh terlalu besar, karena dapat membuat zeolit cepat jenuh sehingga kemampuan adsorpsinya turun.

#### Kepustakaan

- [1]. Hinotani, K. 1983. "Development of Solar Actuated Zeolite Refrigeration System". Solar World Congress, Vol.1, Pergamon Press, pp. 527-531.
- [2]. Grenier, Ph. 1983. "Experimental Result on a  $12\text{ m}^3$  Solar Powered Cold Store Using the Intermittent

Zeolite 13x-Water Cycle". Solar World Congress, Pergamon Press, pp. 353-358, 1984

- [3]. Pons, M. 1986. "Design of solar powered solidadsorption ice-maker". ASME J. of Solar engineering, 108, 332-337, 1986.
- [4]. Zhu, Z. 1987. "Testing of a Solar Powered Zeolitev Water Refrigerator". M. Eng. Thesis, AIT, Bangkok.
- [5]. Kreussler, S. 1999. "Experiments on Solar adsorption refrigeration Using Zeolite and Water". Laboratory for Solar Energy, university of Applied Sciences Germany.
- [6]. Ramos, Miguel. 2003. "Evaluation Of A Zeolite-Water Solar Adsorption Refrigerator". ISES Solar World Congress (June, 14-19, 2003), Goteborg, Sweden

