

RANCANG BANGUN DAN PENGUJIAN SISTEM PENDINGIN ADSORPSI DENGAN DUA ADSORBER

THE DESIGN AND TESTING OF ADSORPTION REFRIGERATION SYSTEM WITH TWO ADSORBERS

Andi Taufan* dan Nasruddin**

*Balai Besar Pengembangan Teknologi Tepat Guna, LIPI
Jln. Aipda K.S. Tubun No. 5 Subang, Jawa Barat 41213

**Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Depok, Jawa Barat
Pos-el: andtaufan@gmail.com

ABSTRACT

This paper discusses design and testing of adsorption refrigeration system with two adsorbers. Main components consisted of two adsorber with 6.6 kg solidified activated carbon inside, expansion valve, evaporator, condenser, and reservoir. All of that were connected with stainless steel pipes. The test performed for 75 minutes using 250 ml of methanol pro-analysis of 99.9% as a refrigerant in the system and the water temperature is 25°C which is pumped through copper pipes to cool the adsorbents. The air pressure in the system during the test were in vacuum. The average pressure difference between the adsorber and the evaporator during testing was 4.6 cmHg. The lowest temperature was 14°C obtained after the 65th minute.

Keywords: adsorption refrigeration, two adsorber adsorbentadsorbate

ABSTRAK

Makalah ini membahas tentang perancangan dan pengujian sistem pendingin adsorpsi dengan dua adsorber. Komponen utama terdiri dari dua adsorber yang berisi 6,3 kg karbon aktif yang dipadatkan, katup ekspansi (*globe valve*), evaporator, kondenser, dan reservoir. Semua komponen utama dihubungkan dengan pipa *stainless steel*. Pengujian dilakukan selama 75 menit menggunakan 250 ml metanol pro-analisis 99,9% sebagai refrigeran di dalam sistem dan air dengan suhu 25°C yang dipompa melalui pipa-pipa tembaga di dalam adsorben untuk mendinginkan adsorben. Tekanan udara di dalam sistem selama pengujian berada pada kondisi vakum. Rata-rata perbedaan tekanan antara adsorber dan evaporator selama pengujian sebesar 4,6 cmHg. Temperatur terendah yang diperoleh adalah 14°C yang dicapai setelah menit ke-65.

Kata kunci: pendingin adsorpsi, dua adsorber, adsorben, adsorbat

PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi yang terjadi setiap tahun menghadirkan tantangan baru terkait dengan pemanasan global dan penipisan ozon. Penggunaan energi dari mesin-mesin dianggap sebagai salah satu penyebab utama terjadinya berbagai kerusakan lingkungan. Kesadaran dunia mengenai isu lingkungan menyebabkan diadakannya Konferensi Perubahan Iklim PBB

2007 di Nusa Dua, Bali, untuk membahas dampak pemanasan global. Hal ini dianggap perlu untuk menyatukan visi dan misi dalam menghadapi dampak pemanasan global akibat sejumlah kerusakan lingkungan. Beberapa usaha untuk mengurangi emisi gas rumah kaca diatur di beberapa negara berkembang dari aspek teknikal dan nonteknikal.¹

Mesin pendingin merupakan salah satu yang berkontribusi terhadap pemanasan global, tidak hanya dari konsumsi energi tetapi juga dari penggunaan gas rumah kaca sebagai refrigeran. Beberapa jenis refrigeran juga mengakibatkan penipisan lapisan ozon apabila terlepas ke atmosfer. Protokol Montreal (1987) yang mengatur tentang substansi penyebab penipisan ozon dan Protokol Kyoto (1997) tentang pembatasan gas rumah kaca dapat menjadi acuan untuk mengurangi dampak lingkungan terkait dengan refrigeran.^{2,3}

Pendingin adsorpsi ramah terhadap lingkungan karena menggunakan air, metanol, dan amonia sebagai refrigeran.⁴ Sistem pendingin adsorpsi mendapatkan perhatian karena tidak terdapat bagian yang bergerak dan memungkinkan untuk menggunakan energi panas yang rendah, seperti energi panas matahari atau gas buang industri untuk regenerasi dalam adsorben.⁵ Sistem ini dapat memanfaatkan gas buang hasil pembakaran atau sinar matahari sebagai sumber panas untuk proses desorpsi dan air untuk proses adsorpsi. Proses penyerapan di dalam sistem yang dibuat vakum dapat menggunakan karbon aktif, *zeolit*, dan *silica gel* sebagai adsorben. Metanol digunakan sebagai adsorbat yang memiliki *zero Ozone Depleting Potential* dan *zero Global Warming Potential*.

Critoph dan Vogel dan Meunier telah mempelajari performa karbon aktif-metanol, zeolit-air, dan pasangan lainnya,^{6,7} dan hasilnya menunjukkan karbon aktif-metanol merupakan pasangan ideal untuk energi surya memiliki *coefficient of performance* tinggi dan *generating temperature* rendah.⁸ Wang juga melakukan perbandingan tipe adsorber untuk pasangan karbon aktif-metanol dengan menggunakan karbon aktif *granular* dan karbon aktif yang dipadatkan⁸ maka didapatkan performa karbon aktif yang dipadatkan lebih baik. Dalam penelitian lainnya, Wang menggunakan karbon aktif yang dipadatkan karena lebih kompak dan performa *mass transfer* dapat ditingkatkan dengan menyusun ulang celah untuk aliran gas.⁹

Sistem pendingin adsorpsi dapat digunakan di daerah yang tidak terjangkau aliran listrik karena bentuknya yang secara fisik sederhana dan menggunakan sumber panas yang cukup rendah.

Selain itu dapat digunakan pada kapal nelayan sebagai pengganti mesin pendingin mekanik sehingga lebih ekonomis dalam konsumsi bahan bakar karena energi diperoleh dari pemanfaatan panas dari mesin kapal.

Pendingin adsorpsi dengan dua adsorber dirancang agar proses pendinginan pada evaporator dapat dilakukan secara terus-menerus. Pada saat salah satu adsorber mengalami proses adsorpsi untuk menghasilkan efek pendinginan, maka adsorber lainnya akan mengalami proses desorpsi untuk melepaskan partikel adsorbat dari adsorben menuju kondenser yang selanjutnya menuju reservoir.

Penelitian ini dilakukan untuk membuat prototipe alat pendingin adsorpsi dengan dua adsorber. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal alat pendingin adsorpsi dua adsorber dengan volume metanol yang digunakan sebanyak 250 ml melalui percobaan siklus kerja alat, sehingga dapat diketahui temperatur terendah yang dapat dilakukan oleh alat pada akhir proses.

TEORI

Berdasarkan adsorben yang telah dibuat Maulana di Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia,¹⁰ diasumsikan pembekuan 1 kg air dengan temperatur 32°C, maka massa uap metanol yang harus diserap karbon aktif untuk membuat 1 kg es dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dasar:¹¹

$$q_{tersimpan} = m \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Kemudian dalam Maulana¹⁰ diturunkan menjadi:

$$m_{meth} \cdot h_{fg, meth} = m_{air} \cdot c_{p, air} \cdot \Delta T + m_{air} \cdot L_{air} \quad (2)$$

Keterangan:

m_{meth} = massa metanol (kg)

$h_{fg, meth}$ = kalor laten vaporasi metanol (1100 kJ/kg)

m_{air} = massa air (kg)

$c_{p, air}$ = kalor spesifik air (4.18 kJ/kg K)

ΔT = perbedaan temperatur awal dengan akhir (K) atau (C)

L_{air} = kalor laten air (333.7 kJ/kg)

Massa metanol yang diserap setiap gram karbon

aktif didapatkan dari persamaan:¹⁰

$$m = n.MR \quad (3)$$

Keterangan:

m = massa metanol yang diserap setiap gram karbon aktif

n = kapasitas penyerapan metanol setiap gram karbon aktif (6 mmol/gr)

MR = massa molar metanol (32.04 gr/mol)

Massa karbon aktif didapatkan dari perbandingan hasil persamaan (2) dan (3) sebagai:¹⁰

$$\text{Massa karbon aktif} = \frac{m_{meth}}{m} \quad (4)$$

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dilakukan perancangan dan pembuatan alat pendingin adsorpsi. Konsep alat mengikuti sistem pendingin mekanik yang memiliki kondenser, evaporator, katup ekspansi, dan kompresor. Fungsi kompresor digantikan oleh adsorber yang berfungsi untuk menyerap dan melepaskan metanol. Semua komponen kemudian dihubungkan menggunakan pipa *stainless steel* dengan cara pengelasan, kemudian alat ukur tekanan dan temperatur dipasang pada komponen (adsorber, kondenser, reservoir, dan evaporator).

Sebelum dilakukan pemasangan isolasi pada evaporator dan adsorber, lebih dulu dilakukan pengujian kebocoran pada keseluruhan sistem. Pengujian ini dilakukan dengan sistem divakum mencapai -75 cmHg (1 cmHg abs) kemudian ditunggu hasilnya setelah 24 jam. Apabila tekanan mengalami kenaikan, dilakukan kompresi pada sistem dengan udara kemudian melakukan pencarian titik kebocoran dengan menggunakan busa sabun pada sambungan hasil pengelasan. Indikasi kebocoran dapat dilihat dari gelembung yang terjadi akibat udara yang keluar dari dalam sistem.

Pengujian sistem adsorpsi dilakukan secara eksperimen di Laboratorium Pendingin Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, pada 12 Desember 2008 (perhatikan Gambar 1). Pengujian adsorpsi dilakukan setelah proses *degassing* atau desorpsi pada adsorben. *Degassing* merupakan proses pemanasan adsorben dengan temperatur 150–200°C selama 2–3 jam.¹² Pada proses ini substansi yang melekat pada permukaan adsorben akan terlepas, karena dalam percobaan

ini metanol pada adsorben akan dilepaskan ke lingkungan dengan membuka katup R_1 dan sistem divakum dengan pompa. Proses desorpsi hampir sama dengan proses *degassing*, tetapi katup R_1 dalam keadaan tertutup agar kondisi sistem tetap terpisah dengan lingkungan.

Proses adsorpsi dimulai dengan mendinginkan adsorber menggunakan air bertemperatur 25°C selama 30 menit menggunakan *circulating thermostatic bath* (CTB) untuk proses *pre-cooling*. Air dialirkan melalui pipa tembaga pada *flange adsorber* yang terhubung dengan adsorben di dalam adsorber. Pada proses ini katup A_1 , A_2 , E_1 , dan E_2 dalam keadaan tertutup.

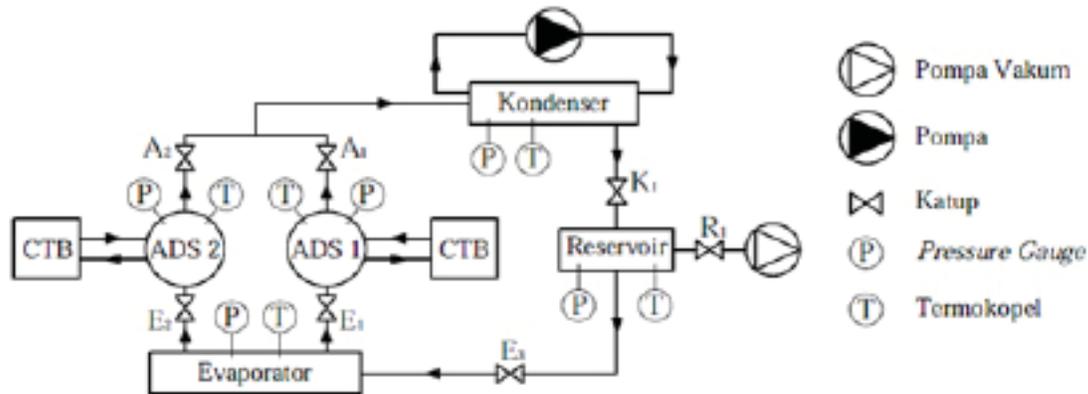
Setelah 30 menit, katup E yang menghubungkan adsorber yang didinginkan dengan evaporator dibuka agar metanol di dalam evaporator dapat diserap oleh karbon aktif yang berfungsi sebagai adsorben dan katup E_3 dalam keadaan tertutup. Tekanan di dalam evaporator akan menurun mengikuti tekanan adsorber. Dalam kondisi tekanan rendah, panas dari evaporator digunakan untuk menguapkan metanol sehingga didapatkan efek pendinginan. Proses ini dilakukan selama 75 menit.

Selama proses *pre-cooling* dan adsorpsi diambil data berupa tekanan dan temperatur adsorber serta tekanan dan temperatur evaporator.

Pada saat pengambilan data proses adsorpsi terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu temperatur lingkungan $27 \pm 3^\circ\text{C}$, temperatur air yang masuk ke adsorber dan lilitan kondenser dijaga pada suhu 25°C, katup E_3 dalam kondisi tertutup.

HASIL DAN PEMBAHASAN

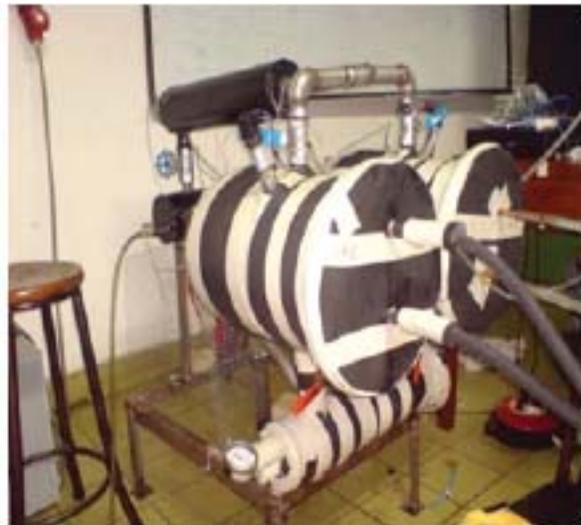
Alat adsorpsi yang dirancang memiliki beberapa komponen utama, yaitu adsorber, evaporator, kondenser, dan reservoir. Skema alat dapat dilihat pada Gambar 1 dan foto alat pada Gambar 2. Di antara kondenser dan katup reservoir dipasang katup (*globe valve*) untuk melakukan proses ekspansi agar terjadi penurunan tekanan dari kondenser menuju reservoir. Pada setiap komponen utama dipasangkan alat ukur untuk mendapatkan tekanan dan temperatur pada saat proses berlangsung.



Gambar 1. Skema Alat Pendingin Adsorpsi



(a)



(b)

Gambar 2. Alat pendingin adsorpsi yang dirancang. (a) Foto alat pendingin adsorpsi kondisi terbuka. (b) Foto alat pendingin adsorpsi kondisi siap diuji coba.

Untuk mendapatkan proses adsorpsi dan desorpsi secara bersamaan, maka digunakan dua buah adsorber. Setiap adsorber berisi tujuh buah adsorben yang dilalui pipa tembaga sebagai penghantar panas dari luar sistem yang dipompa oleh CTB. Di antara susunan adsorben dipasang pelat tembaga (*fin*) untuk menghantarkan panas ke seluruh permukaan adsorben. Panas tersebut yang digunakan adsorben untuk melakukan penyerapan metanol dari evaporator pada proses adsorpsi dan pelepasan metanol menuju kondenser pada proses desorpsi.

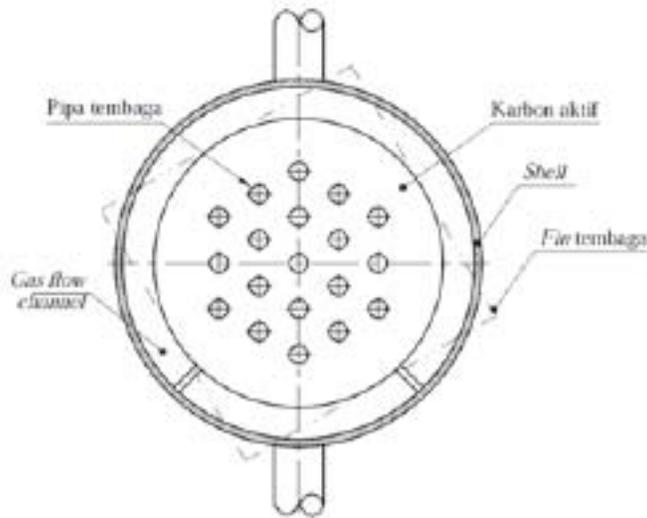
Desain awal adsorber dilakukan dengan memperkirakan massa karbon aktif menggunakan persamaan (1), (2), dan (3). Dengan asumsi efisiensi penyerapan metanol oleh karbon aktif

sebesar 60%, minimal massa karbon aktif yang digunakan adalah 4,5 kg.¹⁰

Struktur potongan adsorber dan foto adsorben yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3. Ukuran adsorber yang telah dipadatkan adalah Ø200x25 mm. Setiap *shell* terdiri dari tujuh buah adsorber dengan berat total sekitar 6,3 kg disesuaikan dengan *shell* adsorber yang telah disediakan.

Kondenser memiliki lilitan pipa tembaga di dalamnya yang akan dialiri air dari pompa sentrifugal dengan arah berlawanan (*counterflow*) untuk mengubah fase metanol dari gas menjadi cair. Pada komponen ini dipasang katup yang menghubungkan sistem dengan lingkungan.

Res



(a)



(b)

Gambar 3. Desain dan Gambar Adsorber (a) Struktur Potongan Adsorber (b) Foto Adsorber

Evaporator berbentuk *double tube* dengan pipa bagian dalam digunakan sebagai kabin dan tempat pendinginan air. Hubungan ke komponen lainnya dibatasi dengan menggunakan katup *ball valve*.

Setelah dilakukan pengujian saat kebocoran pada alat (kontak antara kondisi sistem dan lingkungan) khususnya di adsorber 2 telah dapat diatasi, maka didapatkan data seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tekanan adsorber yang ditunjukkan pada Tabel 1 merupakan hasil konversi pendekatan matematis dari besaran mA yang terbaca dari *pressure transmitter*, yakni proses adsorpsi dilakukan pada tekanan vakum.

Dari data yang diperoleh akan dilakukan analisis tekanan dan temperatur pada adsorber 2. Data tekanan dan temperatur di adsorber 1, temperatur di kondenser dan reservoir cenderung sama karena kondisi katup yang menghubungkannya ke komponen lain dalam keadaan tertutup.

Pada saat katup E_2 dibuka, tekanan di adsorber mulai mengalami kenaikan (Gambar 4) sebagai akibat adsorben menyerap metanol dari evaporator. Pada lima menit awal terjadi perubahan tekanan yang signifikan dari 0,2 cmHg abs. pada awal proses menjadi 1,2 cmHg abs. Kemudian pada menit ke-10 menjadi 1,4 cmHg abs. dan selanjutnya cenderung stabil hingga

menit terakhir proses adsorpsi mencapai 1,5 cmHg abs. Jadi, selama 75 menit proses tersebut adsorber mengalami perubahan tekanan sebesar 1,3 cmHg.

Tekanan di evaporator juga mengalami penurunan yang sangat signifikan hingga lima menit awal proses, yaitu dari 8 cmHg abs. Pada menit ke-0 menjadi 6 cmHg abs. pada menit ke-5. Selanjutnya tekanan pada evaporator stabil pada tekanan 6 cmHg abs. hingga akhir proses. Jadi, selama 75 menit terjadi perubahan tekanan sebesar 2 cmHg.

Kenaikan tekanan pada adsorber dan penurunan tekanan pada evaporator pada saat awal proses diakibatkan oleh penyesuaian tekanan antara evaporator dan adsorber karena pada saat awal proses terdapat perbedaan tekanan antara adsorber dan evaporator sebesar 7,8 cmHg.

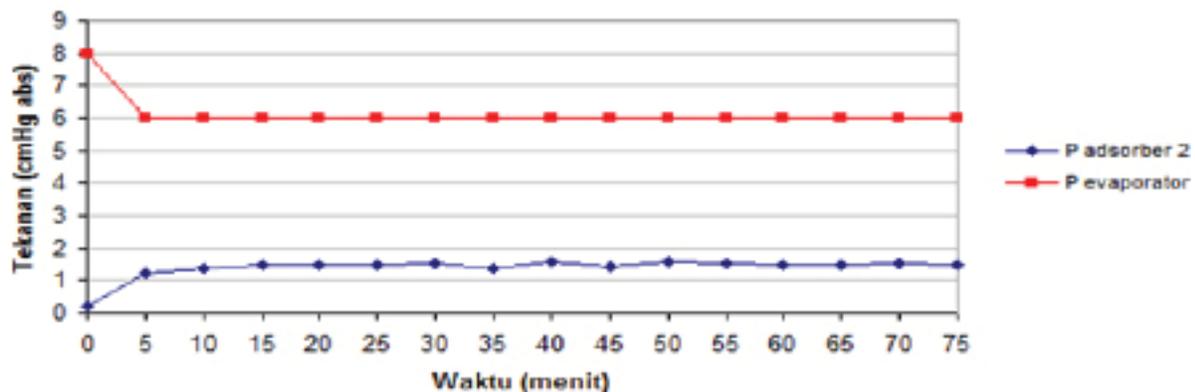
Perbedaan tekanan (Δp) antara adsorber 2 dan evaporator yang terjadi setiap 5 menit selama 75 menit dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar 5 menunjukkan perbedaan tekanan pada saat awal proses sebesar 7,8 cmHg. Kondisi ini menyebabkan proses penyerapan metanol lebih banyak terjadi akibat perbedaan tekanan yang besar antara kedua komponen.

Tabel 1. Data Proses Adsorpsi di Adsorber 2

Waktu (menit)	P ads 2 (cmHg)	T ads 2 (°C)	P ads 1 (cmHg)	T ads 1 (°C)	P evap (cmHg)	T evap (°C)	T kond (°C)	T resv (°C)
0	0,2	20,2	1,0	21,1	8	20	20,1	20,5
5	1,2	20,5	1,5	21,2	6	18,9	20,1	20,4
10	1,4	20,7	1,8	21,1	6	18,2	20,1	20,4
15	1,5	20,7	1,8	21,1	6	17,2	20,1	20,4
20	1,5	20,7	1,6	21,1	6	16,5	20,2	20,3
25	1,5	20,6	1,8	21	6	15,7	20	20,2
30	1,5	20,7	2,0	21	6	15,3	20,1	20,2
35	1,4	20,5	2,2	21	6	15	20	20,1
40	1,6	20,4	2,0	20,9	6	14,7	19,9	20,1
45	1,4	20,4	2,4	20,8	6	14,5	19,8	19,9
50	1,6	20,2	2,3	20,7	6	14,3	19,7	19,8
55	1,5	20,2	2,4	20,7	6	14,2	19,7	19,8
60	1,5	20,1	2,5	20,6	6	14,2	19,5	19,8
65	1,5	20	2,5	20,5	6	14	19,5	19,7
70	1,5	19,9	2,5	20,7	6	14	19,5	19,8
75	1,5	19,9	2,8	20,6	6	14	19,6	19,7

Keterangan: Ads 1 = adsorber 1; Ads 2 = adsorber 2; evap = evaporator; kond. = kondenser; resv. = reservoir

Grafik Tekanan terhadap Waktu saat Adsorpsi Adsorber 2



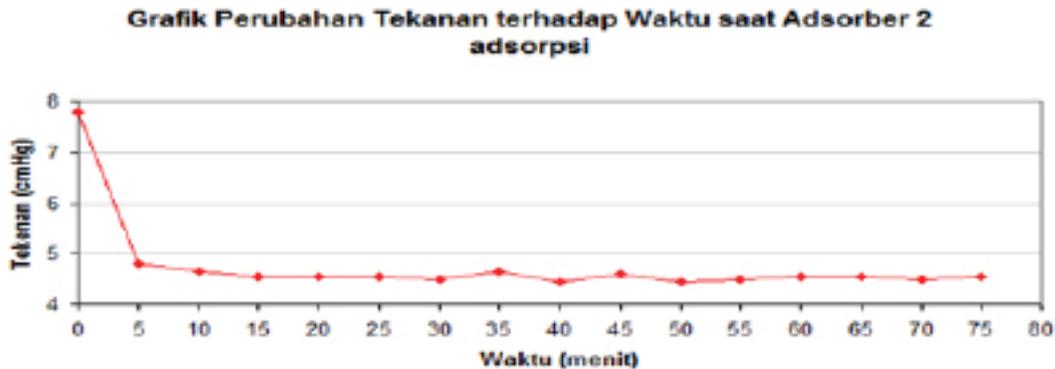
Gambar 4. Perubahan tekanan adsorber 2 dan evaporator saat adsorpsi di adsorber 2.

Setelah menit ke-5, tekanan cenderung stabil hingga akhir proses dengan nilai terkecil Δp adalah 4,4 cmHg dan nilai terbesar 4,8 cmHg pada awal proses. Jadi, *range* perubahan tekanan pada saat tekanan di evaporator dan adsorber mulai stabil yaitu sebesar 4,4–4,8 cmHg dengan rata-rata perubahan tekanan sebesar 4,6 cmHg.

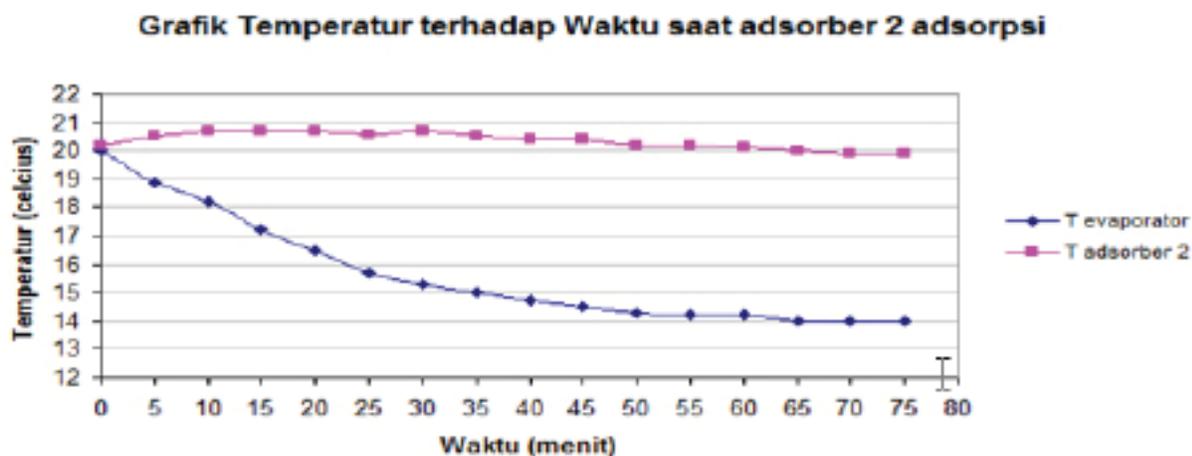
Perbedaan tekanan antara adsorber dan evaporator ini dapat dijadikan indikasi performa *mass transfer* adsorben yang digunakan. Dengan membandingkan besarnya perbedaan tekanan

antara satu adsorben dan adsorben lainnya, proses penyerapan adsorbat oleh adsorben dapat diketahui lebih banyak terjadi akibat perbedaan tekanan atau kemampuan penyerapan oleh adsorben itu sendiri.

Penurunan tekanan di evaporator akibat penyesuaian tekanan rendah di adsorber mengakibatkan perubahan temperatur di kedua komponen tersebut. Dalam kondisi tekanan rendah, kalor dari evaporator digunakan untuk menguapkan metanol sehingga didapatkan efek pendinginan.



Gambar 5. Perbedaan tekanan antara adsorber 2 dan evaporator saat adsorpsi di adsorber 2.



Gambar 6. Perubahan temperatur di adsorber 2 dan evaporator saat adsorpsi di adsorber 2

Gambar 6 memperlihatkan temperatur di evaporator mengalami penurunan selama proses adsorpsi berlangsung, begitu juga pada adsorber. Pada saat awal proses temperatur di evaporator 20°C kemudian turun secara perlahan hingga mencapai 14°C pada menit ke-65, selanjutnya temperatur tersebut bertahan hingga akhir proses. Jadi, proses adsorpsi oleh adsorber memiliki ΔT sebesar 6°C.

Adsorber juga mengalami penurunan temperatur dari 20,3°C menjadi 19,9°C pada menit ke-75. Perbedaan temperatur awal dan akhir sebesar 0,4°C. Hal ini terjadi sebagai akibat aliran air yang melalui pipa tembaga pada adsorben dan efek pendinginan yang terjadi di evaporator.

Setelah mencapai temperatur terendah pada menit ke-65, pada menit selanjutnya hanya mempertahankan temperatur tersebut. Hal ini terjadi akibat adsorben sudah cukup jenuh dengan metanol sehingga tidak lagi menyerap metanol dari evaporator. Selain itu dapat pula terjadi akibat

metanol di evaporator telah terserap seluruhnya oleh adsorben sehingga pada menit selanjutnya tidak terjadi lagi penurunan temperatur.

KESIMPULAN

Dari rancang bangun yang telah dihasilkan didapatkan prototipe alat pendingin adsorber dengan dua adsorber untuk mendinginkan air di evaporator. Dari pengujian dengan menggunakan 250 ml metanol dapat disimpulkan bahwa terjadi penyesuaian tekanan antara adsorber dan evaporator pada saat proses adsorpsi, yaitu tekanan di adsorber mengalami peningkatan dengan perbedaan tekanan antara menit awal dan akhir sebesar 1,3 cmHg. Tekanan di evaporator mengalami penurunan dengan perbedaan tekanan sebesar 2 cmHg. Tekanan mulai stabil pada menit ke-5 dengan kisaran perbedaan tekanan hingga menit akhir sebesar 4,4–4,8 cmHg dengan rata-rata 4,6 cmHg. Pada proses adsorpsi didapatkan temperatur akhir di evaporator sebesar 14°C dengan ΔT sebesar

6°C yang dicapai setelah menit ke-65. Untuk proses pembekuan pada kapal nelayan diperlukan temperatur 0°C. Oleh karena itu, rancang bangun ini masih perlu disempurnakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Prof. Dr. Masno Ginting, M.Sc. sebagai pembimbing penulisan karya tulis ilmiah ini, Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia, Bobi Wahyu Saputra, Ferdinand Delesev Ginting, dan rekan-rekan di Laboratorium Pendingin DTM-UI yang membantu dalam proses perancangan, konstruksi, dan pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Nasruddin. 2005. *Dynamic Modeling and Simulation of a Two-Bed Silicagel-Water Adsorption Chiller*. Dissertation. Germany: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- ²UNEP, Ozone Secretariat United Nations Environment Programme. 2000. *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- ³United Nations. 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations.
- ⁴Wang, L.W., R.Z. Wang, J.Y. Wu, Y.X. Xu, S.G. Wang. 2006. Design, Simulation and Performance of a Waste Heat Driven Adsorption Ice Maker for Fishing Boat. *Energy* 31: 244–259.
- ⁵Suzuki, Motoyuki. 1990. *Adsorption Engineering*. Tokyo: Kodansha Ltd.
- ⁶Critoph, R.E. dan R. Vogel. 1986. Possible Adsorption Pairs for Use in Solar Cooling. *Ambient Energy* 7 (4): 183–190.
- ⁷Meunier, F. 1988. Theoretical Performance of Solid Adsorbent Cascading Cycles Using the Zeolite-Water and Active Carbon-Methanol Pairs: Four Cases Studies. *Heat Recovery System & CHP* 6 (6): 491–498.
- ⁸Wang, L.W., J.Y. Wu, R.Z. Wang, Y.X. Xu, S.G. Wang, X.R. Li. 2003. Study of the Performance of Activated Carbon–Methanol Adsorption Systems Concerning Heat and Mass Transfer. *Applied Thermal Engineering* 23: 1.605–1.617.
- ⁹Wang, L.W., J.Y. Wu, R.Z. Wang, Y.X. Xu, S.G. Wang, X.R. Li. 2003. Experimental Study of a Solidified Activated Carbon-Methanol Adsorption Ice Maker. *Applied Thermal Engineering* 23: 1.453–1.462.
- ¹⁰Maulana, Muhammad. 2008. *Proses Pembuatan Adsorbent pada Sistem Pendingin Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif dan Metanol*. Tugas Akhir. Depok: Universitas Indonesia
- ¹¹Pitts, Donald R., Ph.D. dan L. E. Sissom, Ph.D., P.E. 1998. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer Second Edition*. New York: McGraw-Hill.
- ¹²Suryawan, Bambang. 2004. *Karakteristik Zeolit Indonesia sebagai Adsorben Uap Air*. Disertasi. Jakarta: Universitas Indonesia