

Perancangan dan Pembuatan Pendingin Adsorpsi Berselang Skala Kecil

Indra Gunawan dan I Made Astina

Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia 40132
Phone: +62-22-2504243, Fax: +62-22-2534099
E-mail: indra_gunawan_muslimin@yahoo.co.id

Abstrak

Rasio elektrifikasi Indonesia per Maret 2012 baru mencapai 74,3%. Hal ini menunjukkan bahwa di Indonesia masih banyak daerah terpencil yang belum teraliri listrik namun membutuhkan pendingin untuk memperpanjang masa simpan makanan. Dengan menggunakan mesin pendingin adsorpsi, warga di daerah terpencil mampu memanfaatkan sumber energi alternatif seperti panas matahari dan biomassa untuk mendinginkan makanan. Karena itu, mesin pendingin adsorpsi berselang skala kecil penting untuk dikembangkan.

Dalam penelitian ini, tahapan awal dimulai dengan pemilihan adsorben-adsorbat dan simulasi siklus kerja pendingin adsorpsi dengan diagram Clayperon. Tahapan berikutnya adalah perancangan rinci yang meliputi perancangan kondensor, perancangan evaporator, perancangan generator (adsorber), dan evaluasi kinerja mesin. Pasangan adsorben-adsorbat yang digunakan adalah karbon aktif dengan metanol. Berdasarkan rancangan, jumlah metanol yang bersiklus sebesar 0,033 kg. Massa adsorben berupa karbon aktif yang digunakan sebanyak 0,142 kg. Pendinginan kondensor dan bahan yang didinginkan di evaporator menggunakan air sedangkan proses pemanasan dan desorpsi pada adsorber menggunakan kompor gas dengan media pemanasan berupa udara. Proses pemanasan dan desorpsi membutuhkan waktu 21 menit sedangkan temperatur evaporator 11,2°C. Hasil perancangan menunjukkan besarnya COP sebesar 0,22. Purwa rupa mesin pendingin adsorpsi ukuran kecil berhasil dibuat. Pada saat pengujian, proses pemanasan dan desorpsi menggunakan kompor dilakukan selama 25 menit dan temperatur dinding evaporator mampu mencapai 12,8°C.

Keywords: mesin pendingin adsorpsi, berselang, adsorben-adsorbat, karbon aktif, metanol

Pendahuluan

Rasio elektrifikasi Indonesia per Maret 2012 baru mencapai 74,3% [1]. Hal ini menunjukkan bahwa di Indonesia masih banyak daerah terpencil yang belum teraliri listrik namun membutuhkan pendingin untuk memperpanjang masa simpan makanan, menghasilkan es untuk mendinginkan ikan hasil tangkapan nelayan kecil, maupun mendinginkan vaksin untuk dikirimkan ke daerah-daerah terpencil. Mesin pendingin kompresi membutuhkan energi listrik agar dapat bekerja sehingga mesin ini tidak dapat digunakan di daerah terpencil yang belum terjangkau listrik. Berdasarkan kondisi mesin pendingin adsorpsi yang mampu bekerja tanpa listrik ini sangat penting untuk dikembangkan.

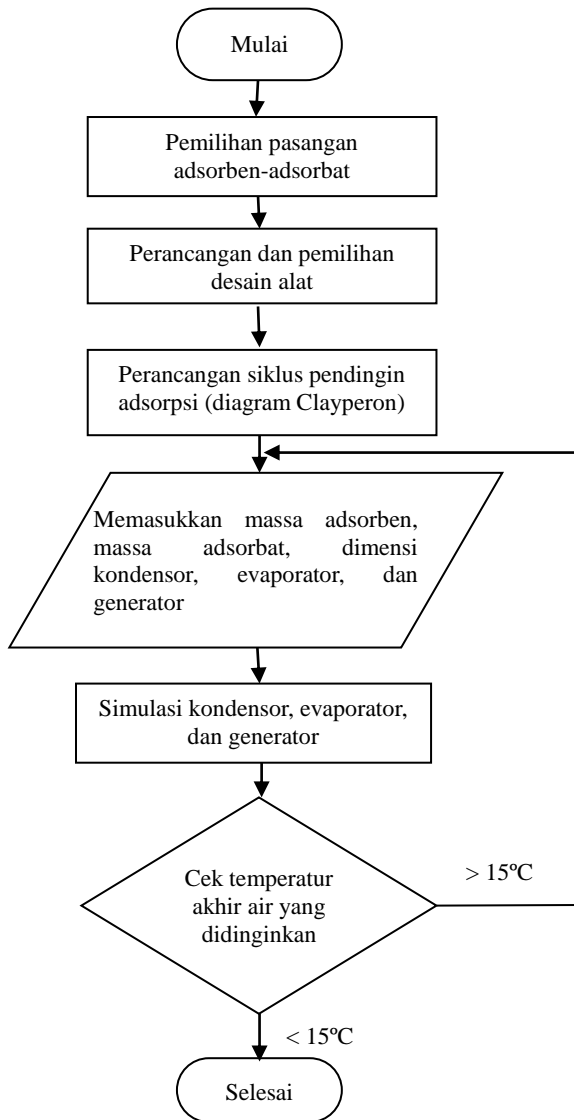
Siklus refrigerasi adsorpsi menggunakan padatan sebagai adsorbat dan fluida sebagai adsorben. Fluida ini bersiklus dalam mesin pendingin adsorpsi. Padatan (adsorbat) yang digunakan harus memiliki kemampuan menyerap fluida tinggi.

Di Peru, Miguel bersama timnya [2] sudah melakukan eksperimen mesin refrigerasi adsorpsi bertenaga matahari. Pada eksperimen ini, peneliti merancang sistem *intermittent* (tidak berkelanjutan) sehingga mesin dapat dibuat dalam skala kecil dengan komponen yang lebih sedikit. Eksperimen tersebut menggunakan zeolit sebagai adsorbat dan air sebagai adsorben (fluida). Mesin ini membutuhkan sumber panas bertemperatur 200°C. Di Jepang, teknologi pendingin dengan memanfaatkan siklus refrigerasi adsorpsi menurut penelitian pada tahun 2001 dapat dilakukan dengan hanya menggunakan sumber energi panas bertemperatur 55°C [3]. Eksperimen tersebut diuji pada sistem refrigerasi berkelanjutan yang berukuran besar.

Metodologi Perancangan

Perancangan di dalam dunia teknik adalah membuat komponen, sistem, atau proses yang mampu menjalankan fungsi secara optimal dan menjadi solusi dari sejumlah permasalahan. Proses perancangan dalam penelitian ini tidak dilakukan sampai produk siap pakai

namun hanya sampai purwa rupa skala kecil. Dalam penelitian ini, tahapan awal dimulai dengan pemilihan adsorben-adsorbat dan simulasi siklus kerja pendingin adsorpsi dengan diagram Clayperon. Tahapan berikutnya adalah perancangan rinci yang meliputi perancangan kondensor, perancangan evaporator, perancangan generator (adsorber), dan evaluasi kinerja mesin. Proses perancangan pendingin adsorpsi ini disajikan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses perancangan pendingin adsorpsi.

Pemilihan Pasangan Adsorben-Adsorbat

Ada beberapa pasangan adsorben adsorbat yang dapat digunakan pada mesin refrigerasi adsorpsi. Empat pasangan adsorben-adsorbat yang telah diuji di berbagai laboratorium di dunia yaitu karbon aktif-metanol, karbon aktif-amoniak, silika gel-air, dan zeolit-air. Tabel 1 memperlihatkan

ringkasan data berbagai jenis pasangan adsorben-adsorbat hasil penelitian di berbagai tempat di dunia yang dirangkum oleh Wang dan Oliveira[3].

Tabel 1. Perbandingan adsorben adsorbat yang digunakan pada mesin refrigerasi adsorpsi [3]

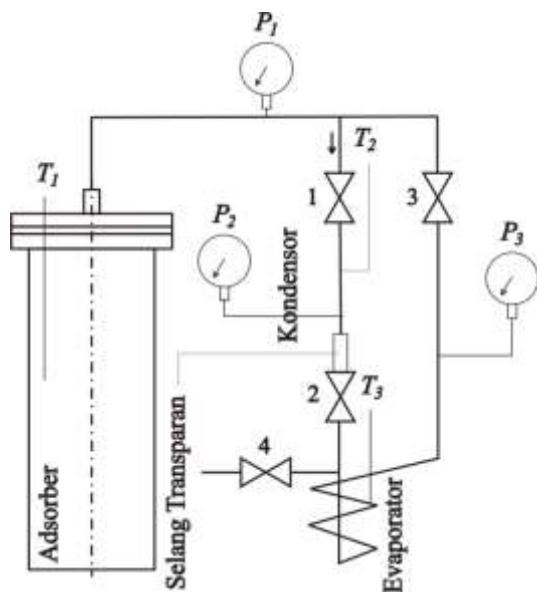
Adsorben-Adsorbat	Temperatur sumber panas atau energi	COP	Tahun
AC-Metanol	20 MJm ⁻² day ⁻¹	0,12	1986
AC-NH ₃	105°C	0,10	1997
AC-Metanol	18,1-19,2 MJm ⁻² day ⁻¹	0,12-0,14	2002
AC-Metanol	17-20 MJm ⁻² day ⁻¹	0,13-0,15	2004
Silika Gel-Air	15,4 MJm ⁻² day ⁻¹	0,16	2004
AC + Blackened Steel-Metanol	20 MJm ⁻² day ⁻¹	0,16	2004
AC-Metanol	< 120°C	0,18	2005
AC + CaCl ₂ -NH ₃	< 120°C	0,41	2005
Silika Gel-Air	55°C	0,36	2001
AC-Metanol	100°C	0,4	2001
Silika Gel-Air	65°C	0,28	2003
Silika Gel-Air	75-95°C	0,35-0,60	2004
Silika Gel-Air	80-95°C	0,3-0,6	2004
Silika Gel-Air	80°C	0,33-0,50	2005
AC-NH ₃	232°C	0,42-1,19	1996
Zeolit-Air	204°C	0,6-1,6	1988
Zeolit-Air	230°C	0,41	1999
Zeolit-Air	310°C	0,38	2000
AC-NH ₃	100°C	0,2	2003
Zeolit-Air	230-300°C	0,20-0,21	2004

Di antara pasangan-pasangan tersebut, pasangan karbon aktif-metanol dipilih karena tekanan yang dibutuhkan tidak terlalu rendah namun mampu mencapai titik evaporasi pada temperatur rendah (pada -73 cmHg titik didihnya sudah di bawah 0°C). Selain itu pasangan karbon aktif-metanol pada tahun 2011 ini sudah berhasil diteliti dan dikembangkan oleh Laboratorium Teknik Pendingin Program Studi Teknik Mesin ITB sehingga perancangan awal mesin pendingin adsorpsi dapat dilakukan dengan menggunakan data hasil penelitian tersebut.

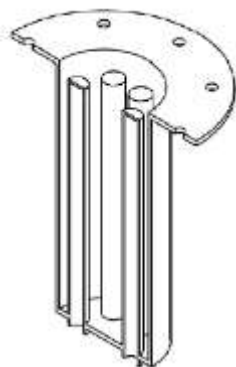
Target dan Rancangan

Alat pendingin adsorpsi terdiri tiga komponen utama yaitu adsorber, kondensor, dan evaporator. Masing-masing komponen tersebut dipisahkan oleh katup. Gambar 2 menunjukkan gambar susunan seluruh komponen dalam mesin pendingin adsorpsi yang dibuat. Pada gambar tersebut, katup 4 berfungsi sebagai saluran masuk saat pengisian fluida kerja (refrigeran). Masing-masing komponen dihubungkan dengan *pressure gage* untuk mendapatkan data perubahan tekanan.

Tabung adsorber dibuat dari pipa baja dengan sisi dalam pipa dipasang enam pipa kecil (seperti ditunjukkan oleh Gambar 3) untuk memperluas kontak perpindahan panas. Sedangkan komponen kondensor dan evaporator dibuat dari pipa tembaga standar sistem pendingin yang dibuat koil. Pemilihan pipa tembaga sendiri karena selain tembaga memiliki konduktivitas termal yang tinggi dibanding logam lain juga kemudahan dalam mencari bahan dan proses pembuatan. Pada ujung bawah pipa kondensor dipasang selang transparan untuk melihat jumlah metanol yang telah mengembun sebelum dialirkan ke evaporator.



Gambar 2. Susunan komponen pendingin adsorpsi mini.

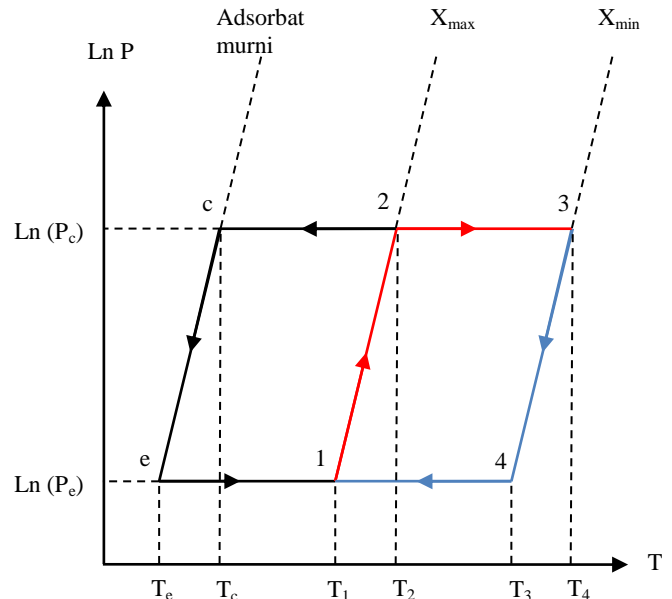


Gambar 3. Desain adsorber (gambar potongan).

Simulasi Siklus Pendingin Adsorpsi

Siklus pendingin adsorpsi dapat digambarkan dalam diagram Clayperon [4] seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Proses 1-2 merupakan proses pemanasan dengan perbandingan massa adsorbat terhadap massa adsorben tetap (isoters). Proses 2-3 merupakan proses desorpsi yaitu penurunan massa adsorbat yang terkandung dalam adsorben. Proses

ini berlangsung pada tekanan tetap (isobar). Proses 3-4 merupakan proses pendinginan adsorber sedangkan proses 4-1 merupakan proses adsorpsi yaitu kenaikan massa adsorbat yang terkandung dalam adsorben karena temperatur turun.



Gambar 4. Siklus pendingin adsorpsi (diagram Clayperon).

Kapasitas adsorpsi (penyerapan) dan desorpsi (pelepasan) pasangan adsorben dan adsorbat dalam siklus refrigerasi adsorpsi dapat dicari dengan persamaan (1) yang biasa disebut persamaan Dubinin-Astakhov (D-A).

$$x = x_0 \exp \left[-k \left(\left(\frac{T}{T_s} \right) - 1 \right)^n \right] \quad (1)$$

Nilai x_0 , k , dan n masing-masing 0,28568, 28,03, dan 1,95. Nilai-nilai tersebut didapat dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Wimmonad[4] pada tahun 2011. Karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif mesh 10×10 (ukuran butir 2,5-3 mm) dengan penambahan 10% garam NaCl.

Perancangan Kondensor

Pada bagian kondensor, fluida kerja akan membuang panas ke lingkungan karena temperatur fluida kerja lebih tinggi dari temperatur lingkungan. Perpindahan panas yang terjadi pada kondensor terdiri dari pengembunan (kondensasi) di dalam kondensor, konduksi pada pipa kondensor, dan konveksi bebas di bagian luarnya.

Model kondensor yang dipilih adalah koil. Pada proses pengembunan, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. sifat dievaluasi pada T_f dengan $T_f = (T_s + T_{sat})/2$,
2. h_{fg} dievaluasi pada T_{sat} ,

3. radiasi diabaikan,
4. T_s seragam,
5. kondisi metanol yang masuk ke kondensor adalah uap jenuh, dan
6. kondensasi terjadi di dalam pipa dengan kecepatan aliran sangat rendah.

Kondensasi terjadi di dalam pipa dengan kecepatan aliran sangat rendah karena tidak ada aliran paksa di dalam pipa. Persamaan yang dapat digunakan untuk kasus tersebut adalah persamaan (2) yang direkomendasikan oleh Chato [5].

$$\bar{h}_D = 0,555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} C_{p,l} (T_{sat} - T_s) \quad (3)$$

Tahanan termal pada proses pengembunan ini memenuhi persamaan (4).

$$R_{pengembunan} = \frac{1}{\bar{h}_D A} \quad (4)$$

Pada perpindahan panas konduksi, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain kondisi tunak, bahan seragam yaitu tembaga, tidak ada pembangkitan panas, dan perpindahan panas dimodelkan sebagai sistem satu dimensi melewati pelat vertikal.

Tahanan termal pada konduksi dinding ini memenuhi persamaan (5).

$$R_{konduksi} = \frac{x}{k A} \quad (5)$$

Pada perpindahan panas konveksi bebas, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan adalah radiasi diabaikan, sifat dievaluasi pada T_f dengan $T_f = (T_s + T_{sat})/2$, silinder isothermal (temperatur sepanjang dinding sama), dan sistem dimodelkan sebagai pipa panjang.

Sebelum mencari koefisien perpindahan panas konveksi, bilangan Rayleigh perlu dicek terlebih dahulu dengan persamaan (6).

$$Ra_D = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\nu \alpha} \quad (6)$$

Bilangan Nusselt dapat dicari dengan persamaan (7) yang dibuat oleh Churchill and Chu [7] untuk berbagai nilai Rayleigh.

$$\bar{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 (7) Ra_L \leq 10^{12} \quad (8)$$

$$\bar{h}_D = \frac{\bar{Nu}_D k}{D} \quad (9)$$

Tahanan termal konveksi bebas memenuhi persamaan (10).

$$R_{konveksi bebas} = \frac{1}{\bar{h}_D A} \quad (10)$$

Perancangan Evaporator

Pada bagian evaporator, fluida kerja akan mengambil panas dari air yang akan didinginkan karena temperatur fluida kerja di dalam evaporator cukup dingin. Perpindahan panas yang terjadi pada evaporator terdiri dari konveksi bebas air yang ingin didinginkan, konduksi pada tembaga, dan pendidihan (evaporasi) di dalam pipa.

Pada proses pendidihan, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan adalah pendidihan inti ($5^\circ\text{C} < \Delta T_e < 30^\circ\text{C}$), sifat fluida dievaluasi pada T_{sat}, T_s seragam, dan radiasi diabaikan.

Untuk kasus ini, persamaan (11) yang dikembangkan oleh Rohsenow [5] dapat digunakan untuk mencari fluks panas.

$$\dot{q}_s = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad (11)$$

$$\Delta T_e = T_s - T_{sat} \quad (12)$$

Untuk pasangan air dengan tembaga, nilai $C_{s,f} = 0,0060$ dan nilai $n = 1,0$. Tahanan termal pada proses pengembunan ini memenuhi persamaan (13).

$$R_{pendidihan} = \frac{1}{h_{pendidihan} A} \quad (13)$$

$$h_{pendidihan} = \frac{\dot{q}_s}{(\Delta T_e)} \quad (14)$$

Pada perpindahan panas konduksi, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan adalah kondisi tunak, bahan seragam, bahan yang digunakan adalah tembaga, tidak ada pembangkitan panas, dan perpindahan panas satu dimensi melewati pelat vertikal.

Tahanan termal pada konduksi dinding ini memenuhi persamaan (5). Untuk konveksi bebas, metode perhitungan sama dengan metode konveksi bebas pada kondensor.

Perhitungan Kalor Adsorber dan COP

Pada bagian adsorber ini, fluida kerja berupa uap dari evaporator akan diserap oleh adsorben (proses adsorpsi, proses 4-1 pada Gambar 4). Setelah adsorben jenuh, proses pemanasan dimulai untuk menaikkan tekanan (proses 1-2 pada Gambar 4) dan kemudian proses desorpsi (proses 2-3 pada Gambar 4) untuk melepaskan fluida kerja dari adsorben sehingga fluida kerja bisa masuk ke kondensor. Jumlah energi yang diperlukan pada proses pemanasan dan desorpsi [6] dapat dihitung menggunakan persamaan (15).

$$Q_g = m_a C_{pa} \Delta T_a + (m_{r,d} - m_{r,g}) C_{pr} \Delta T_r + m_{r,g} (h_2 - h_1) + m_{r,g} h_{sg} \quad (15)$$

Untuk mengetahui kinerja dari mesin pendingin

yang telah dirancang, *Coefficient of Performance* (COP) dihitung dengan persamaan (16).

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (16)$$

Hasil dan Pembahasan

Hasil Perancangan Siklus Pendingin Adsorpsi

Ada beberapa hal yang perlu diasumsikan antara lain:

1. tekanan kondensor (P_c) sebesar 1 bar,
2. tekanan di evaporator (P_e) sebesar -70 cmHg (*gage*) sesuai dengan kemampuan pompa vakum yang ada,
3. temperatur awal pemanasan (T_1) sebesar 26°C, dan
4. temperatur akhir desorpsi (T_3) sebesar 200°C.

Berdasarkan data sifat termodinamika metanol, temperatur penguapan di evaporator (T_e) dan temperatur pengembunan di kondensor (T_c) masing-masing sebesar 11,2°C dan 64,1°C. Nilai X_{max} , X_{min} , T_2 , dan T_4 dapat dicari dengan persamaan (1). Nilai x_0 , k , dan n masing-masing 0,28568, 28,03, dan 1,95 berdasarkan hasil penelitian Wimmonad[4].

Nilai X_{max} didapat dari persamaan (1) dengan nilai T dan T_s masing-masing T_1 dan T_e .

$$\begin{aligned} X_{max} &= x_0 \exp \left[-k \left(\left(\frac{T_1}{T_e} \right) - 1 \right)^n \right] \\ &= 0,28568 \exp \left[-28,03 \left(\left(\frac{(26 + 273,15)}{(11,2 + 273,15)} \right) - 1 \right)^{1,95} \right] \\ \Leftrightarrow X_{max} &= 0,261 \frac{\text{kg metanol}}{\text{kg karbon aktif}} \end{aligned}$$

Nilai X_{min} didapat dari persamaan (1) dengan nilai T dan T_s masing-masing T_3 dan T_c .

$$\begin{aligned} X_{min} &= x_0 \exp \left[-k \left(\left(\frac{T_3}{T_c} \right) - 1 \right)^n \right] \\ &= 0,28568 \exp \left[-28,03 \left(\left(\frac{(200 + 273,15)}{(64,1 + 273,15)} \right) - 1 \right)^{1,95} \right] \\ \Leftrightarrow X_{min} &= 0,002 \frac{\text{kg metanol}}{\text{kg karbon aktif}} \end{aligned}$$

Untuk mencari T_2 , persamaan (1) dapat digunakan dengan nilai X_{max} menggunakan nilai yang telah didapat sebelumnya dan nilai T_s adalah T_c (temperatur kondensor).

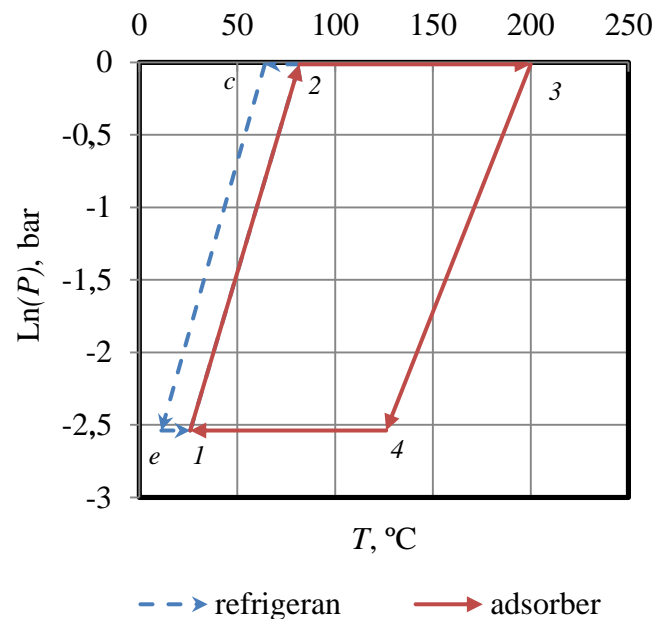
$$X_{max} = x_0 \exp \left[-k \left(\left(\frac{T_2}{T_c} \right) - 1 \right)^n \right]$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow T_2 &= \left(\left[\sqrt[n]{\frac{X_{max}}{x_0}} + 1 \right] \right) T_c \\ \Leftrightarrow T_2 &= \left(\left[\sqrt[1,95]{\frac{0,261}{0,28568}} + 1 \right] \right) (64,1 + 273,15) \\ \Leftrightarrow T_2 &= 354,8 \text{ K} = 81,7^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Untuk mencari T_4 , persamaan (1) dapat digunakan dengan nilai X_{min} menggunakan nilai yang telah didapat sebelumnya dan nilai T_s adalah T_e (temperatur evaporator).

$$\begin{aligned} X_{min} &= x_0 \exp \left[-k \left(\left(\frac{T_4}{T_e} \right) - 1 \right)^n \right] \\ \Leftrightarrow T_4 &= \left(\left[\sqrt[n]{\frac{X_{min}}{x_0}} + 1 \right] \right) T_e \\ \Leftrightarrow T_4 &= \left(\left[\sqrt[1,95]{\frac{0,002}{0,28568}} + 1 \right] \right) (11,2 + 273,15) \\ \Leftrightarrow T_4 &= 399,1 \text{ K} = 126,0^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Data-data tersebut selanjutnya disajikan dalam diagram Clayperon pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Clayperon hasil rancangan.

Jumlah adsorben yaitu karbon aktif ditentukan sebesar 250 ml atau 0,142 kg sesuai kapasitas tabung adsorber sehingga jumlah metanol yang bersiklus dapat dihitung dengan persamaan (17). Sedangkan jumlah metanol yang diam pada karbon aktif dapat dihitung dengan persamaan (18).

$$m_{r,g} = (X_{max} - X_{min}) m_a \quad (17)$$

$$\Leftrightarrow m_{r,g} = (0,261 - 0,002) 0,142$$

$$\Leftrightarrow m_{r,g} = 0,0367 \text{ kg} = 36,7 \text{ gram}$$

$$m_{r,d} = X_{min} m_a \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow m_{r,d} = 0,002 \times 0,142 = 0,0003 \text{ kg} = 0,3 \text{ gram}$$

Simulasi Kondensor

Kondensor terdiri dari pipa tembaga berdiameter ¼ inci, tebal dinding 1 mm, dan panjang 3 cm yang di ujung bawahnya dihubungkan dengan selang transparan. Berdasarkan data tersebut, luas area perpindahan panas kondensor sama dengan luas selimut silinder pipa tembaga yaitu sebesar $5,98 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Asumsi perhitungan yang digunakan sesuai dengan penjelasan bagian sebelumnya.

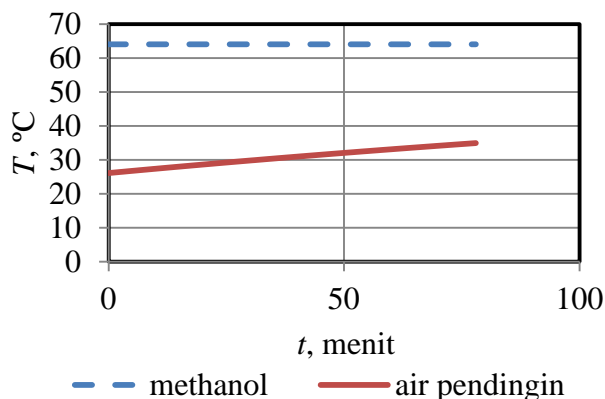
Kondisi bagian luar dan dalam kondensor yang perlu ditentukan antara lain:

1. kondisi metanol yang masuk dari adsorber menuju kondensor adalah uap jenuh sesuai penjelasan pada subbab 3.4 dengan tekanan (P_c) 1 bar dan temperatur jenuh (T_c) 64,1°C,
2. kondensor dicelupkan ke dalam 1 kg air bertemperatur awal 26°C,
3. temperatur dinding pipa (T_s) di kondensor diasumsikan sama dengan temperatur lingkungan yaitu 26°C sehingga temperatur rata-rata untuk menentukan sifat (T_f) sebesar 45,0°C, dan
4. konduktivitas termal tembaga sebesar 401 W/m·K [7].

Jumlah energi panas yang harus dibuang melalui kondensor adalah

$$Q_c = m_{r,g}(h_{c,l} - h_{c,g}) = 0,033(1100,72 - (-1,08)) = 37,24 \text{ kJ}$$

Hasil perubahan temperatur kondensor terhadap waktu diperlihatkan pada gambar 6.



Gambar 6.Perubahan temperatur terhadap waktu pada kondensor.

Waktu yang dibutuhkan untuk membuang 37,24 kJ kalor adalah 77 menit dengan menggunakan 1 kg air bertemperatur awal 26°C.

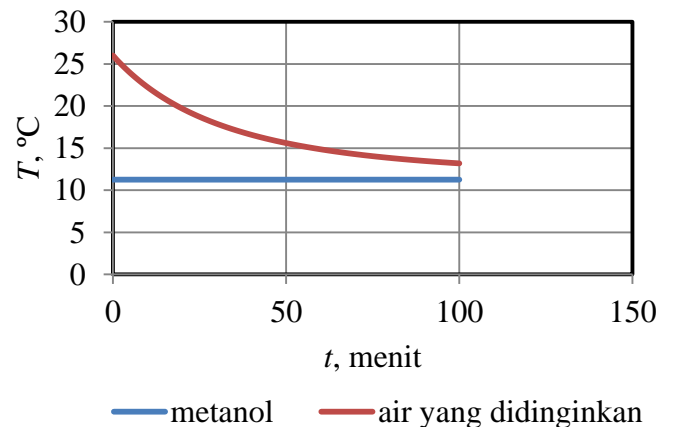
Simulasi Evaporator

Tekanan pendidihan fluida kerja pada evaporator (P_c) sebesar -70 cmHg. Pada tekanan tersebut, temperatur pendidihan metanol sebesar 11,2°C. Kalor yang diserap di evaporator adalah

$$Q_e = m_{r,g}(h_1 - h_e)$$

$$= 0,031(1049,50 - (-139,86)) = 37,24 \text{ kJ}$$

Evaporator terdiri dari pipa tembaga berdiameter ¼ inci dan panjang 1,2 meter yang dililit membentuk koil. Dengan konduktivitas termal tembaga sebesar 401 W/m·K [5] dan sisi dalam evaporator diisi dengan 0,1 kg air bertemperatur awal 26°C, penurunan temperatur 0,1 kg air tersebut akibat penyerapan panas pada proses pendidihan fluida kerja dapat disimulasikan dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 7. Waktu yang dibutuhkan oleh 0,1 kg air untuk mencapai temperatur kurang dari 15°C adalah 58 menit.



Gambar 7.Perubahan temperatur terhadap waktu pada evaporator.

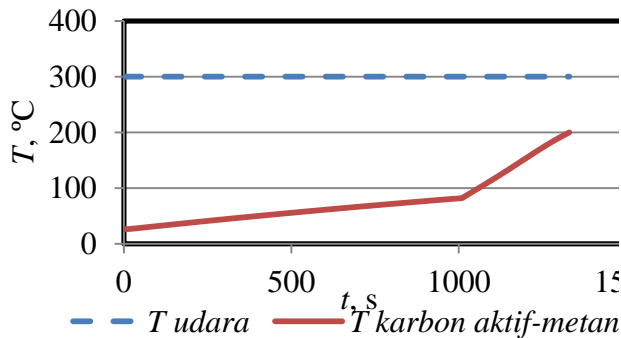
Simulasi Adsorber

Proses yang terjadi pada adsorber ada empat yaitu pemanasan, desorpsi, pendinginan, dan adsorpsi. Proses pemanasan dan desorpsi membutuhkan panas dari luar sedangkan proses pendinginan dan desorpsi membuang panas ke luar.

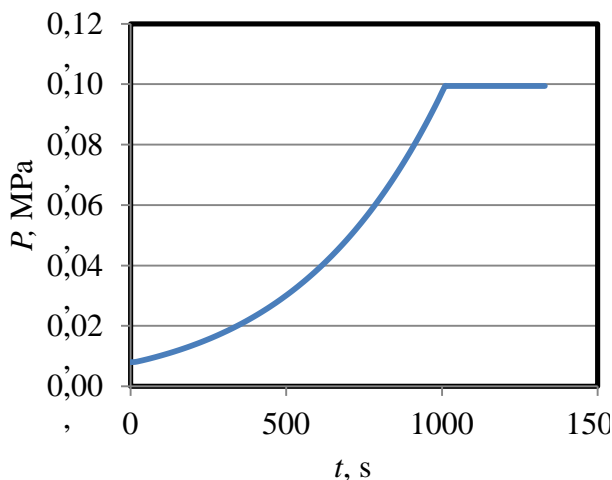
Pada proses pemanasan dan desorpsi, temperatur awal pemanasan (T_f) dan temperatur akhir desorpsi (T_3) masing-masing sebesar 26°C dan 200°C. Pemanasan dilakukan dengan media udara. Pada pengujian yang sesungguhnya, proses pemanasan dilakukan dengan meletakkan tabung adsorber di atas kompor yang menyala. Material yang digunakan pada adsorber adalah baja karbon dengan konduktivitas termal sebesar 60,5

W/m·K dan tebal 3 mm. Konduktivitas termal karbon aktif yang mengandung metanol menurut Critoph [7] sebesar 0,11 W/m·K dan nilai kalor spesifik 0,93 kJ/kg.

Simulasi perubahan temperatur adsorber dapat dilihat pada Gambar 8. Pada gambar tersebut terlihat adanya patahan pada kurva temperatur karbon aktif-metanol. Hal ini disebabkan karena sebelum patahan tersebut terjadi proses pemanasan dengan kandungan massa metanol dalam karbon aktif konstan (proses isoters) sedangkan setelah patahan terjadi penurunan massa metanol dalam karbon aktif (proses desorpsi), seperti ditunjukkan pada Gambar 10, sehingga kenaikan temperatur menjadi lebih cepat setelah patahan. Proses pemanasan membutuhkan waktu 989 detik atau 16,4 menit sedangkan desorpsi 341 detik atau 5,6 menit sehingga total waktu 21 menit. Proses pemanasan dan desorpsi membutuhkan energi kalor sebesar 192,64 kJ. Proses perubahan tekanan (Gambar 9) dan perubahan massa metanol yang terkandung dalam karbon aktif (Gambar 10) dapat dimodelkan menggunakan persamaan (1).



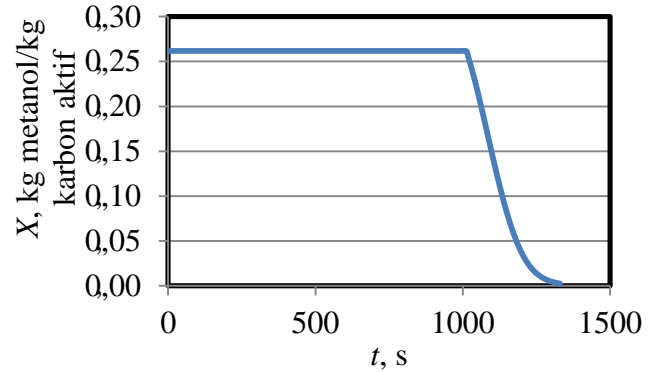
Gambar 8.Perubahan temperatur adsorber saat pemanasan dan desorpsi.



Gambar 9.Perubahan tekanan karbon aktif-metanol saat pemanasan dan desorpsi.

Metode analisis yang digunakan pada proses pendinginan dan adsorpsi sama dengan proses

pemanasan dan desorpsi. Adsorber cukup diletakkan di ruangan terbuka bertemperatur udara 26°C. Pada Gambar 11 terlihat proses pendinginan membutuhkan waktu 138 detik atau 2 menit 18 detik sedangkan proses adsorpsi membutuhkan waktu 19107 detik atau 5 jam lebih sampai dengan temperatur 26°C .

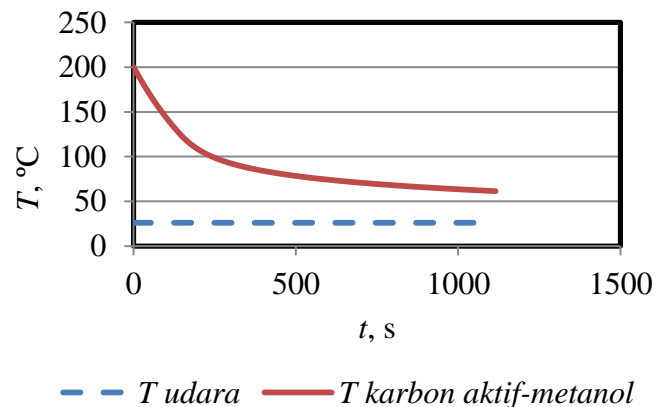


Gambar 10.Perubahan massa metanol dalam karbon aktif saat pemanasan dan desorpsi.

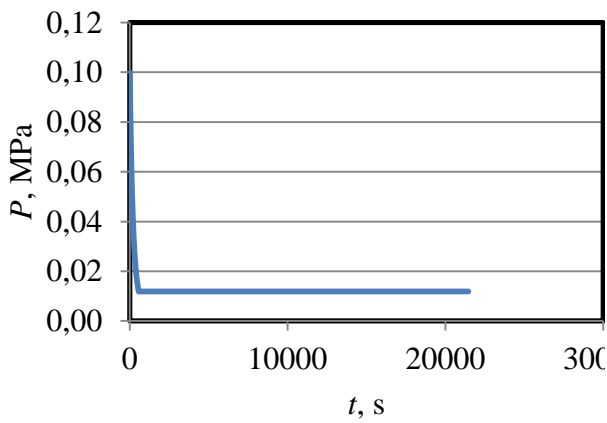
COP Sistem

Kinerja sistem pendingin dapat dihitung dengan persamaan (16). Kalor yang mampu diserap evaporator adalah sebesar 37,24 kJ sedangkan kalor yang diperlukan dalam proses pemanasan dan desorpsi adalah sebesar 192,64 kJ sehingga COP rancangan sistem pendingin adsorpsi berselang skala kecil ini adalah 0,22.

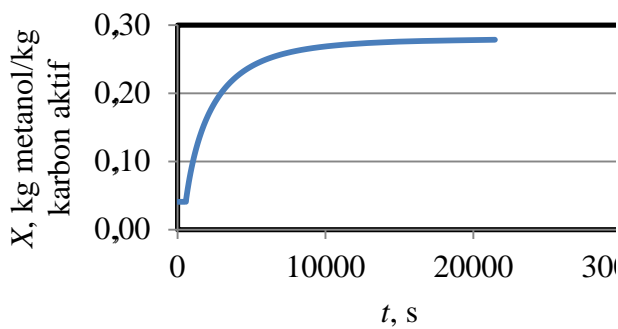
$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{37,24}{192,64} = 0,22$$



Gambar 11.Perubahan temperatur adsorber saat pendinginan dan adsorpsi.



Gambar 12.Perubahan tekanan karbon aktif-metanol saat pendinginan dan adsorpsi.



Gambar 13.Perubahan massa metanol dalam karbon aktif saat pendinginan dan adsorpsi.

Pembuatan Adsorber

Tabung adsorber terdiri dari pipa baja berdiameter luar 3,5 inci yang di tengahnya dipasang enam pipa baja berdiameter luar 5/8 inci. Pipa-pipa tersebut disusun seperti gambar teknik pada lampiran.

Untuk mengoptimalkan perpindahan panas, karbon aktif diusahakan menempel pada dinding dalam tabung adsorber. Kasa digunakan untuk menjaga agar posisi butiran karbon aktif tetap menempel di dinding seperti terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14.Posisi kasa dalam tabung adsorber.

Pembuatan Evaporator dan Kondensor

Komponen evaporator terdiri dari pipa tembaga berdiameter luar ¼ inci sepanjang 1,2 meter. Pipa tersebut dibuat spiral sehingga memperkecil pemakaian tempat. Untuk meminimalkan kerugian panas, evaporator diselubungi dengan karet isolator seperti ditunjukkan pada Gambar 15.

Kondensor hanya terdiri dari pipa tembaga lurus yang dihubungkan dengan selang transparan untuk mengecek jumlah metanol yang sudah mengembun di kondensor sebelum dialirkan ke evaporator. Kondensor hanya terdiri dari pipa lurus karena jumlah metanol yang bersiklus sangat sedikit sehingga diharapkan gas metanol dari tabung adsorber yang mengembun dapat dengan mudah menetes, turun, dan berkumpul di ujung bawah kondensor. Karena ujung bawah kondensor adalah selang transparan, jumlah cairan metanol hasil pengembunan dapat dengan mudah dilihat.



Gambar 15.Komponen evaporator.

Kondensor dan evaporator masing-masing dihubungkan dengan *pressure gage* vakum untuk mengetahui tekanan di dalam masing-masing komponen. *Pressure gage* disambung menggunakan tee. Gambar 16 memperlihatkan hasil perakitan seluruh komponen.



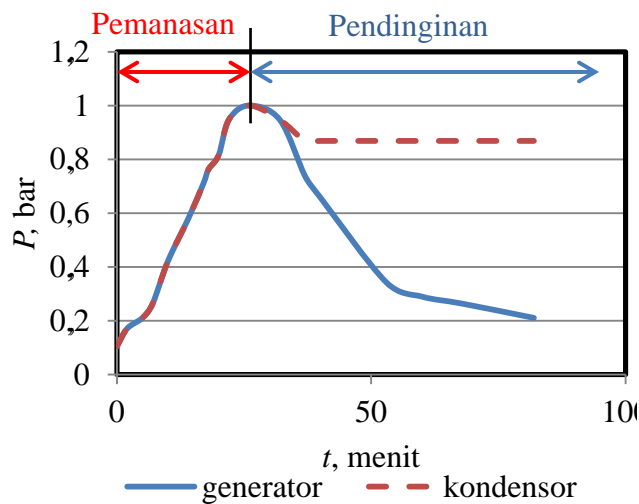
Keterangan:
1. Kondensor
2. Evaporator
3. Adsorber

Gambar 16.Hasil perakitan total.

Hasil Pengujian

Proses pengujian dilakukan dengan mencatat perubahan tekanan terhadap waktu saat proses pemanasan dan pendinginan. Gambar 17 menunjukkan data pengujian yang dilakukan pada tanggal 1 Juli 2013. Total waktu yang dibutuhkan pada proses pemanasan dan desorpsi sebesar 25 menit atau 4 menit lebih lama dari hasil simulasi rancangan yaitu 21 menit.

Metanol yang mengembun dapat terlihat pada selang transparan di bagian bawah kondensor seperti diperlihatkan pada Gambar 18. Agar semua tetesan embun metanol turun ke bagian bawah kondensor, kondensor perlu sedikit digetarkan menggunakan tangan. Temperatur dingin yang mampu dicapai pada evaporator adalah 12,8°C seperti ditunjukkan pada Gambar 19. Temperatur evaporator pada rancangan nilainya 11,2°C sehingga temperatur hasil pengujian lebih tinggi 1,6°C dari temperatur rancangan.



Gambar 17. Perubahan tekanan pada adsorber dan kondensor terhadap waktu



Gambar 18. Pengembunan metanol pada bagian selang transparan di kondensor.



Gambar 19. Efek dingin di evaporator mampu mencapai 12,8°C.

Kesimpulan

Berdasarkan rancangan, jumlah metanol yang bersiklus sebesar 0,033 kg. Massa adsorben berupa karbon aktif yang digunakan sebanyak 0,142 kg. Pendinginan kondensor dan bahan yang didinginkan di evaporator menggunakan air sedangkan proses pemanasan dan desorpsi pada adsorber menggunakan kompor gas dengan media pemanasan berupa udara. Proses pemanasan dan desorpsi membutuhkan waktu 21 menit sedangkan temperatur evaporator 11,2°C. Hasil perancangan menunjukkan nilai COP sebesar 0,22.

Purwa rupa mesin pendingin adsorpsi ukuran kecil berhasil dibuat. Pada proses pengujian, proses pemanasan menggunakan kompor dilakukan selama 25 menit dan temperatur dinding evaporator mampu mencapai 12,8°C.

Kapasitas metanol pada alat yang berhasil dibuat terlalu kecil sehingga kemampuan untuk mendinginkannya masih sangat terbatas dibandingkan dengan ukuran total alat. Untuk pembuatan alat berikutnya disarankan memilih ukuran yang lebih besar dengan perhitungan yang lebih matang sehingga alat yang dibuat benar-benar mampu dimanfaatkan sebagai mesin pendingin seperti kulkas atau AC. Selain itu, masalah kebocoran perlu diantisipasi dengan baik agar pembuatan alat lebih cepat.

Nomenklatur

- A luas permukaan perpindahan panas, m^2
- C_p kalor spesifik, $kJ/kg \cdot K$
- g percepatan gravitasi, m/s^2
- h koefisien perpindahan panas konveksi, $W/m^2 \cdot K$
- h_{fg} entalpi perubahan fasa, kJ/kg
- k konduktivitas termal bahan, $W/m \cdot K$
- L tinggi dinding vertikal penukar panas, m
- m massa, kg
- Nu bilangan Nusselt
- \dot{q} fluks perpindahan panas, W/m^2

\dot{q}	laju perpindahan panas, W
Q	energi kalor, J
P	tekanan, Pa
Pr	bilangan Prandtl
R	tahanan termal, K/W
Re	bilangan Reynolds
T	temperatur, °C
x	tebal dinding, m

Greek letters

Γ	laju aliran massa kondensat per unit lebar, kg/s · m
δ	tebal lapisan batas, m
ΔT	selisih temperatur
μ	viskositas dinamik, N · s/m ²
ρ	massa jenis, kg/m ³
ν	gaya viskos, m ² /s

Subscripts

a	adsorben
c	kondensor
e	evaporator
f	fluida
g	generator (adsorber)
l	fasa cair
r,g	fluida kerja yang bersiklus
r,d	fluida kerja yang diam
s	dinding
sat	jenuh
v	fasa gas
∞	kondisi pada fluida tak hingga

Referensi

1. Heriyono, Rasio Elektrifikasi Indonesia Baru Capai 74,3%, *Tambang*, hal. 1, 13 Juli 2012 (http://www.majalahtambang.com/detail_berita.php?category=18&newsnr=5915, diakses 27 Agustus 2012).
2. Miguel Ramos, Rafael L. Espinoza, dan Manfred J. Horn, Evaluation of A Zeolite-Water Solar Adsorption Refrigerator, dipresentasikan pada *ISES Solar World Congress 2003*, Göteborg, Sweden, 14-19 Juni 2003 ([http://fc.uni.edu.pe/mhorn/ISES2003%20\(solar%20refrigeration\).pdf](http://fc.uni.edu.pe/mhorn/ISES2003%20(solar%20refrigeration).pdf), diakses 14 Februari 2012).
3. R. Z. Wang dan R. G. Oliveira, Adsorption Refrigeration – An Efficient Way to Make Good Use of Waste Heat and Solar Energy, dipresentasikan pada *International Sorption Heat Pump Conference*, Denver, CO, USA, 22-24 Juni 2005 (<http://engineering.ucsb.edu/~yuen/references/rer-8.pdf>, diakses 14 Februari 2012).
4. Wimonnad Charote, *Development of Solid Sorption Refrigeration For Ice-Maker*, Thesis, Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2011.
5. Incropera, Dewitt, Bergman, dan Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, Edisi 6, John Wiley & Sons, New York, 2007.
6. E. E. Anyanwu dan N.V. Ogueke, Thermodynamic Design Procedure for Solid Adsorption Solar Refrigerator, *Renewable Energy*, **30**:81-96, 2003 (<https://netfiles.uiuc.edu/bogle/shared/EWB/Fridge/Thermodynamic%20design%20procedure%20for%20adsorption%20solar%20refrigerator.pdf>, diakses 14 Februari 2012).
7. R. E. Critoph, Activated Carbon Adsorption Cycles for Refrigeration And Heat Pumping. Engineering Department, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL. U.K.