

## Simulasi dan Perancangan Pendingin Adsorpsi *Intermitten* 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@s.itb.ac.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. Selama ini mesin pendingin adsorpsi yang dibuat memiliki dimensi yang sangat besar sehingga tidak mudah dibawa dan biaya produksinya tinggi. Untuk itu pada penelitian ini, mesin pendingin adsorpsi ukuran mini dan *intermitten* yang mudah dibawa dan dioperasikan oleh satu orang perlu dirancang.

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 silika gel dengan air. Jumlah adsorbat yang bersiklus sebesar 0,02 kg. Massa adsorben berupa silika gel yang digunakan sebanyak 0,04 kg.

Model mesin pendingin adsorpsi yang dirancang ada tiga model. Model I masih memiliki kelemahan pada desain generator dan model II masih memiliki kelemahan pada desain evaporator dan kondensor. Model III merupakan penyempurnaan dari model I dan II sehingga model III yang dipilih. Dimensi total alat yang dirancang adalah 12,5 cm × 9 cm × 39,5 cm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada ketiga kasus (kasus A 5°C, kasus B 3°C, dan kasus C 1°C) mampu mendinginkan 160 gram air dari temperatur ruangan 27°C ke temperatur di bawah 10°C. Waktu yang dibutuhkan oleh 0,16 kg air untuk mencapai temperatur kurang dari 10°C pada kasus A, B, dan C kurang dari 1 menit sedangkan temperatur akhir setelah 8 menit masing-masing 6,2 °C, 4,0 °C, dan 1,8 °C dan COP masing-masing 0,38, 0,30, dan 0,21. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur evaporator nilai COP semakin rendah. Sumber panas yang digunakan berasal dari 4 kg air panas bertemperatur awal 95°C. Meskipun massa air yang bersiklus sama yaitu 0,02 kg, massa adsorben dan massa air total dalam pendingin adsorpsi yang dibutuhkan semakin banyak untuk temperatur evaporator yang semakin rendah. Pada kasus A, massa air total 0,0396 kg dengan massa adsorben 0,1121 kg. Sedangkan pada kasus B massa air total 0,0490 kg dengan massa adsorben 0,1656 kg dan kasus C massa air total 0,0689 kg dengan massa adsorben 0,2789 kg.

**Keywords:** mesin pendingin adsorpsi, *intermitten*, silika gel, air

### Pendahuluan

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 [1] sudah melakukan eksperimen mesin refrigerasi adsorpsi bertenaga matahari. Pada eksperimen ini, peneliti merancang sistem *intermitten* (tidak berkelanjutan) sehingga mesin dapat dibuat dalam skala kecil

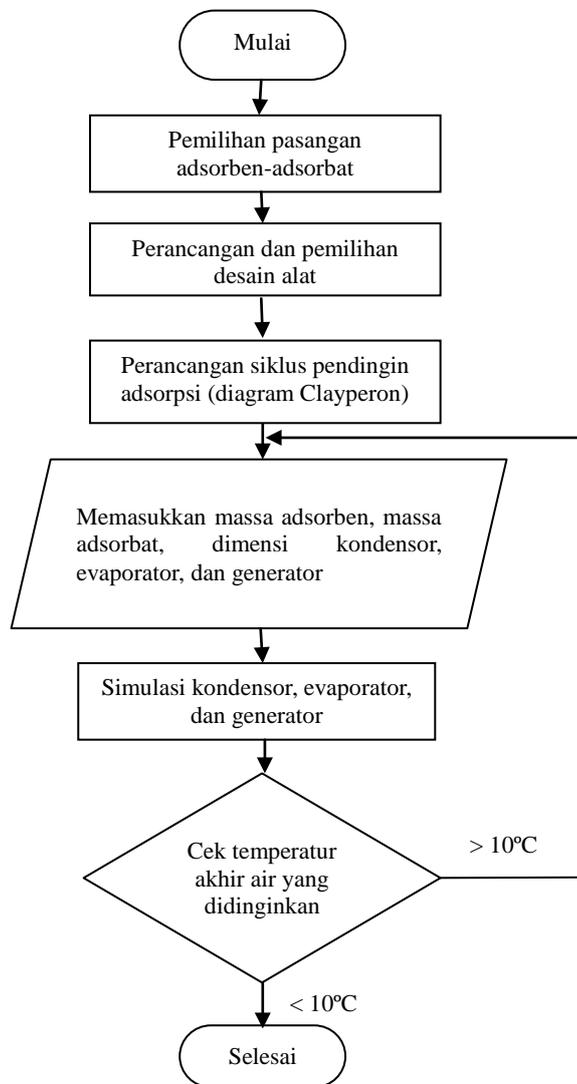
dengan komponen yang lebih sedikit. Eksperimen tersebut menggunakan zeolit sebagai adsorbat dan air sebagai adsorben (fluida). Kelemahan mesin ini adalah mesin ini membutuhkan sumber panas dengan temperatur 200°C sehingga panas matahari saja belum cukup.

Rasio elektrifikasi Indonesia per Maret 2012 baru mencapai 74,3% [2]. 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. Berdasarkan kondisi tersebut, mesin pendingin adsorpsi ukuran mini dan *intermitten* yang mudah dibawa dan dioperasikan oleh satu orang perlu dirancang.

**Metodologi Perancangan**

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 mini 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 data hasil uji.

**Tabel 1.** Perbandingan adsorben adsorbat yang digunakan pada mesin refrigerasi adsorpsi [4]

Adsorben-Ad sorbat	Temperatur sumber panas atau energi	COP	Tahun
AC-Metanol	20 MJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0,12	1986
AC-NH <sub>3</sub>	105°C	0,10	1997
AC-Metanol	18,1-19,2 MJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0,12-0,14	2002
AC-Metanol	17-20 MJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0,13-0,15	2004
Silika Gel-Air	15,4 MJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0,16	2004
AC + Blackened Steel-Metanol	20 MJm <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	0,16	2004
AC-Metanol	< 120°C	0,18	2005
AC + CaCl <sub>2</sub> -NH <sub>3</sub>	< 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 <sub>3</sub>	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 <sub>3</sub>	100°C	0,2	2003
Zeolit-Air	230-300°C	0,20-0,21	2004

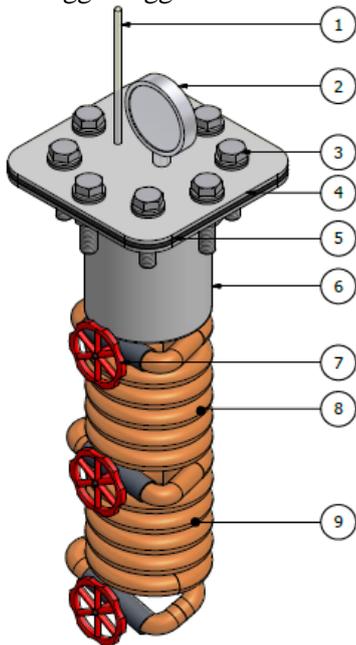
Di antara pasangan-pasangan tersebut, pasangan silika gel-air hanya membutuhkan sumber panas dengan temperatur di bawah 100°C sehingga untuk mendapatkannya cukup dengan menggunakan air panas. Selain itu, silika gel dan air merupakan bahan yang mudah didapat, ramah lingkungan, dan tidak beracun sehingga pasangan tersebut dipilih dalam penelitian ini.

Menurut Saha et al. [4], mesin refrigerasi yang menggunakan pasangan silika gel-air hanya membutuhkan sumber panas bertemperatur 55°C. Eksperimen yang mereka rancang masih menggunakan sistem berkelanjutan sehingga ukurannya cukup besar dengan banyak komponen. Pasangan tersebut dicoba pada sistem refrigerasi adsorpsi *intermitten* (tidak berkelanjutan) sehingga dapat dibuat dalam skala kecil dengan sedikit komponen.

**Target dan Rancangan**

Target dalam desain antara lain dimensinya kecil sehingga mudah dibawa dan dioperasikan oleh satu orang serta proses pembuatan dan komponen minimal dan semudah mungkin. Setelah melakukan kajian secara mendalam, tiga model pendingin adsorpsi mini diusulkan sebagai bahan kajian.

Desain I pada Gambar 2 merupakan desain yang pertama digambar. Kelemahan dari desain ini adalah bagian generator yang berupa tabung memiliki banyak baut yang bisa memberatkan alat serta luas kontak antara silika gel dengan dinding dalam generator masih sangat terbatas. Selain itu, kelemahan lainnya adalah posisi evaporator berada di atas kondensor sehingga tinggi alat total bisa sangat tinggi.



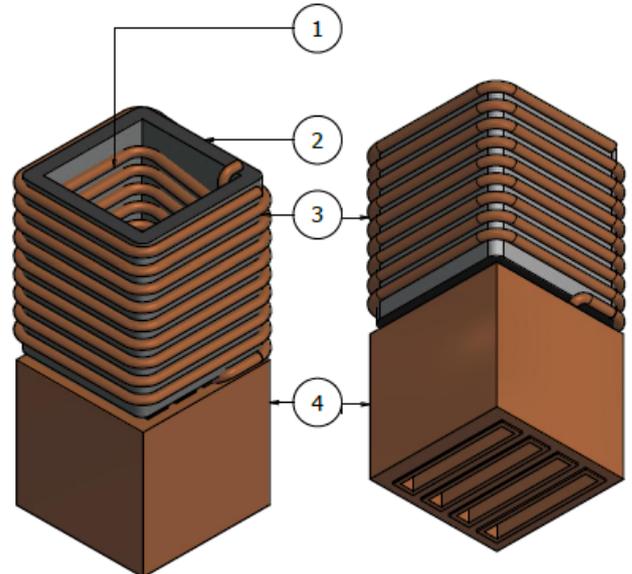
NO	NAMA	JML	KETERANGAN
1	TERMOMETER	1	
2	PRESSURE GAUGE	1	
3	MUR BAIT DAN RING	8 PSG	M10
4	TUTUP	1	PELAT SS 3 mm
5	SEAL	1	KARET
6	ADSORBER/GENERATOR	1	PIPA SS DIA 3 in
7	VALVE	3	
8	KONDENSER	1	PIPA Cu DIA 1/2 in
9	EVAPORATOR	1	PIPA Cu DIA 1/2 in

**Gambar 2.** Pendingin adsorpsi mini model I didesain pada 16 Februari 2012.

Pada desain II yang diperlihatkan pada Gambar 3, bentuk generator diubah menjadi kotak dengan beberapa batang persegi panjang kecil di dalamnya sehingga dapat memperluas area kontak perpindahan panas silika gel. Selain itu, kondensor dibuat mengelilingi evaporator sehingga tinggi alat bisa lebih rendah ketimbang desain I. Kelemahan dari desain II ini adalah lilitan pipa berpotensi menghambat aliran dan bagian kondensor dan evaporator masih perlu dibungkus jika ingin memperbaiki tampilannya.

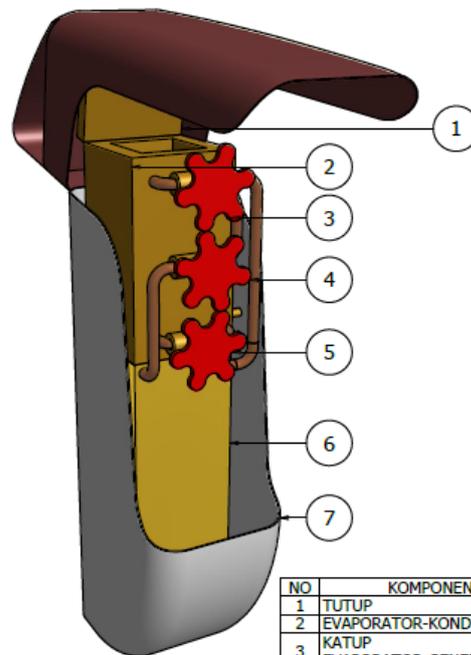
Desain III pada Gambar 4 merupakan penyempurnaan dari desain II. Penyempurnaan dilakukan dengan mengubah kondensor dan evaporator dari lilitan pipa menjadi beberapa batang

persegi berlubang (*square hollow bar*). Desain III tidak membutuhkan bungkus kondensor dan evaporator sehingga proses produksi lebih sedikit. Selain itu ketebalan kondensor dan evaporator bisa ditekan sehingga alat lebih kompak. Desain III inilah yang dipilih.



NO	KOMPONEN	MATERIAL
1	EVAPORATOR	TEMBAGA
2	ISOLATOR	KARET
3	KONDENSER	TEMBAGA
5	GENERATOR	TEMBAGA

**Gambar 3.** Pendingin adsorpsi mini model II didesain pada 14 Agustus 2012.

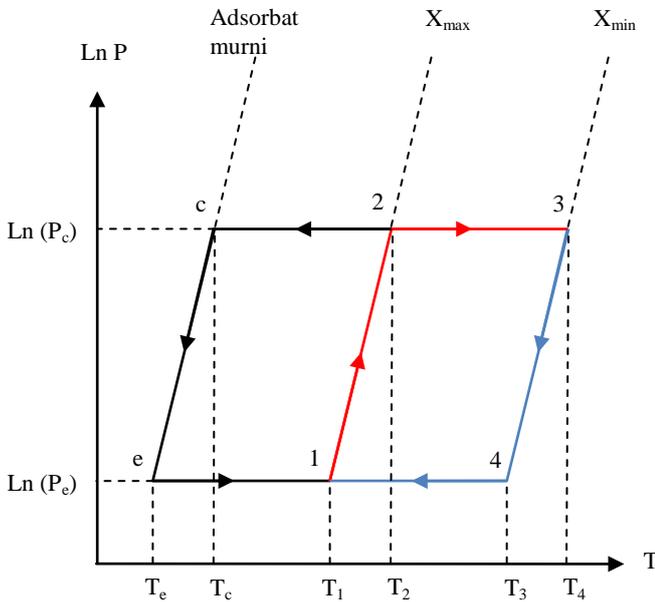


NO	KOMPONEN	MATERIAL
1	TUTUP	KUNINGAN
2	EVAPORATOR-KONDENSER	KUNINGAN
3	KATUP EVAPORATOR-GENERATOR	
4	KATUP GENERATOR-KONDENSER	
5	KATUP KONDENSER-EVAPORATOR	
6	GENERATOR	KUNINGAN
7	TAS	KAIN

**Gambar 4.** Pendingin adsorpsi mini model III didesain pada 24 Agustus 2012.

Simulasi Siklus Pendingin Adsorpsi

Siklus pendingin adsorpsi dapat digambarkan dalam diagram Clayperon [5] seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Siklus pendingin adsorpsi (diagram Clayperon).

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 turunnya temperatur.

Tahapan dalam analisis siklus pendingin adsorpsi yaitu:

1. Tentukan temperatur evaporator ( $T_e$ ), temperatur kondensor ( $T_c$ ), temperatur awal pemanasan ( $T_1$ ), dan temperatur akhir desorpsi ( $T_3$ ). Temperatur akhir desorpsi berkaitan dengan kemampuan temperatur yang mampu dihasilkan oleh sumber panas.
2. Cari tekanan pendidihan ( $P_e$ ) evaporator pada  $T_e$ .
3. Cari nilai perbandingan massa adsorben terhadap massa adsorbat pada proses pemanasan ( $X_{max}$ ) menggunakan persamaan (1) hasil linearisasi model Freundlich untuk pasangan silika gel-air hasil riset Afonso dan Silveira [6].

$$y = 0,355 + (1/0,79)x \tag{1}$$

dengan  $x$  adalah  $\log(P/P_{sat})$  dan  $y$  adalah  $\log(q)$ .  $P_{sat}$  adalah tekanan jenuh saat  $T_1$ ,  $P = P_e$ , dan  $q = X_{max}$ .

4. Cari tekanan pengembunan kondensor ( $P_c$ ) pada  $T_c$ .
5. Cari  $T_2$  dengan melakukan iterasi dari persamaan (1) dengan  $P_{sat}$  adalah tekanan jenuh saat  $T_2$ ,  $P = P_c$ , dan  $q = X_{max}$  (karena proses 1-2 adalah proses *isosteric*).
6. Cari nilai perbandingan massa adsorben terhadap massa adsorbat pada proses pendinginan ( $X_{min}$ ) menggunakan persamaan (1) dengan  $P_{sat}$  adalah tekanan jenuh saat  $T_3$ ,  $P = P_c$ , dan  $q = X_{min}$ .
7. Cari  $T_4$  dengan melakukan iterasi dari persamaan (1) dengan  $P_{sat}$  adalah tekanan jenuh saat  $T_4$ ,  $P = P_e$ , dan  $q = X_{min}$  (karena proses 3-4 adalah proses *isosteric*).

Perancangan Kondensor

Pada bagian kondensor, fluida kerja akan membuang panas ke lingkungan. Kondensor merupakan batang persegi berlubang (*rectangular hollow bar*) mengelilingi evaporator. Perpindahan panas yang terjadi pada kondensor terdiri dari pengembunan (kondensasi) di dalam, konduksi pada *stainless steel*, dan konveksi bebas di bagian luarnya.

Sebelum memilih persamaan untuk menyelesaikan persoalan pengembunan, nilai bilangan Reynolds harus dicari terlebih dahulu dengan persamaan (2).

$$Re_\delta = \frac{4\Gamma}{\mu_l} \tag{2}$$

$$\Gamma(x) = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_l} \tag{3}$$

$$\delta(x) = \left[ \frac{4k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)x}{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}} \right] \tag{4}$$

Untuk  $Re_\delta \leq 30$ , kondisi yang terjadi *wave free laminer* sehingga persamaan yang digunakan untuk mencari  $h$  adalah persamaan (5).

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[ \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h_{fg}'}{\mu_l(T_{sat} - T_s)L} \right]^{1/4} \tag{5}$$

Untuk  $30 \leq Re_\delta \leq 1800$ , kondisi *laminer wavy* sehingga persamaan (6) yang dikembangkan oleh Kutateladze [7] dapat digunakan untuk mencari  $h$ .

$$\frac{\bar{h}_L(v_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{1,08Re_\delta^{1,22} - 5,2} \tag{6}$$

Untuk  $Re_\delta \geq 1800$ , kondisi *turbulen* sehingga persamaan (7) yang dikembangkan oleh Labuntsov [7] dapat digunakan untuk mencari  $h$ .

$$\frac{\bar{h}_L(v_l^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_\delta}{8750 + 58Pr_i^{-0,5}(Re_\delta^{0,75} - 253)} \tag{7}$$

Pada proses pengembunan, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. sifat dievaluasi pada  $T_f = (T_s + T_{sat})/2$ ,
2.  $h_{fg}$  dievaluasi pada  $T_{sat}$ ,
3. radiasi diabaikan, dan
4.  $T_s$  seragam.

Tahanan termal pada proses penguapan ini memenuhi persamaan (8).

$$R_{\text{penguapan}} = \frac{1}{h_L A} \quad (8)$$

Pada perpindahan panas konduksi, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. kondisi tunak,
2. bahan seragam,
3. bahan yang digunakan adalah kuningan,
4. tidak ada pembangkitan panas, dan
5. perpindahan panas satu dimensi melewati pelat vertikal.

Tahanan termal pada konduksi dinding ini memenuhi persamaan (9).

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{x}{k A} \quad (9)$$

Pada perpindahan panas konveksi bebas, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. radiasi diabaikan, dan
2. perpindahan panas konveksi pada pelat vertikal.

Sebelum mencari koefisien perpindahan panas konveksi, terlebih dahulu dicek bilangan Rayleigh dengan persamaan (10).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (10)$$

Jika  $10^4 \leq Ra_L \leq 10^9$ , aliran yang muncul adalah laminar sedangkan jika  $10^9 \leq Ra_L \leq 10^{13}$  aliran yang muncul adalah aliran turbulen. Bilangan Nusselt dapat dicari dengan persamaan Churchill dan Chu [7] untuk berbagai nilai Rayleigh.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (11)$$

$$\bar{h}_L = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (12)$$

Tahanan termal konveksi bebas memenuhi persamaan (13).

$$R_{\text{konveksi bebas}} = \frac{1}{\bar{h}_L A} \quad (13)$$

### Perancangan Evaporator

Pada bagian evaporator, fluida kerja akan mengambil panas dari air yang akan didinginkan. Evaporator terdiri dari dua batang kotak hollow (luar dan dalam) yang kotak dalamnya mengelilingi air yang ingin didinginkan. Perpindahan panas yang terjadi pada evaporator terdiri dari konveksi bebas air yang ingin didinginkan, konduksi pada kuningan, dan pendidihan (evaporasi) di dalamnya.

Pada proses pendidihan, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. pendidihan inti ( $5^\circ\text{C} < \Delta T_e < 30^\circ\text{C}$ ),
2. sifat fluida dievaluasi pada  $T_{\text{sat}}$ ,
3.  $T_s$  seragam, dan
4. radiasi diabaikan.

Untuk kasus ini, persamaan (14) yang

dikembangkan oleh Rohsenow [7] dapat digunakan untuk mencari fluks panas.

$$\dot{q}_s = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left( \frac{c_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right)^3 \quad (14)$$

$$\Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} \quad (15)$$

Untuk pasangan air dengan kuningan, nilai  $C_{s,f} = 0,0060$  dan nilai  $n = 1,0$ . Tahanan termal pada proses penguapan ini memenuhi persamaan (16).

$$R_{\text{pendidihan}} = \frac{1}{h_{\text{pendidihan}} A} \quad (16)$$

$$h_{\text{pendidihan}} = \frac{\dot{q}_s}{(\Delta T_e)} \quad (17)$$

Pada perpindahan panas konduksi, asumsi yang digunakan untuk memudahkan perhitungan antara lain:

1. kondisi tunak,
2. bahan seragam yaitu kuningan,
3. tidak ada pembangkitan panas, dan
4. perpindahan panas satu dimensi melewati pelat vertikal.

Tahanan termal pada konduksi dinding ini memenuhi persamaan (9).

Untuk konveksi bebas, metode perhitungan sama dengan metode konveksi bebas pada kondensor.

### Perhitungan Kalor Generator dan COP

Pada bagian generator ini, fluida kerja berupa uap dari evaporator akan diserap oleh adsorben (proses adsorpsi, proses 4-1 pada Gambar 5). Setelah adsorben jenuh, proses pemanasan dimulai untuk menaikkan tekanan (proses 1-2 pada Gambar 5) dan kemudian proses desorpsi (proses 2-3 pada Gambar 5) untuk melepaskan fluida kerja dari adsorben sehingga fluida kerja bisa masuk ke kondensor. Jumlah energi yang diperlukan pada proses pemanasan dan desorpsi [8] dapat dihitung menggunakan persamaan (18).

$$Q_g = m_a C_{pa} \Delta T_a + (m_{r,d} - m_{r,g}) C_{pr} \Delta T_r + m_{r,g} (h_2 - h_1) + m_{r,g} h_{sg} \quad (18)$$

Untuk mengetahui kinerja dari mesin pendingin yang telah dirancang, *Coefficient of Performance* (COP) dihitung dengan persamaan (19).

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (19)$$

### Hasil dan Pembahasan

#### Hasil Perancangan Siklus Pendingin Adsorpsi

Ada beberapa hal yang perlu ditentukan sesuai dengan metode perancangan pada bagian sebelumnya antara lain:

1. temperatur kondensor ( $T_c$ ) sebesar  $37^\circ\text{C}$ ,

- 2. temperatur awal pemanasan ( $T_1$ ) sebesar 28°C, dan
- 3. temperatur akhir desorpsi ( $T_3$ ) sebesar 80°C.

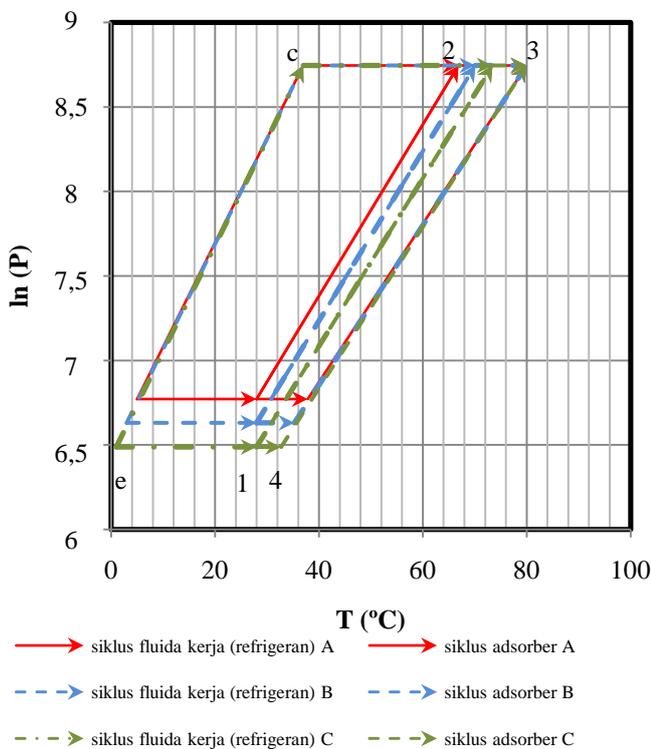
Pada simulasi ini, tiga kasus temperatur penguapan evaporator disimulasikan yaitu:

- a. kasus A temperatur evaporator ( $T_e$ ) sebesar 5°C,
- b. kasus B temperatur evaporator ( $T_e$ ) sebesar 3°C, dan
- c. kasus C temperatur evaporator ( $T_e$ ) sebesar 1°C.

Berdasarkan data di atas, diketahui nilai tekanan penguapan ( $P_e$ ) dan tekanan pengembunan kondensor ( $P_c$ ) dari data sifat air. Nilai  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $T_2$ , dan  $T_4$  dapat dicari dengan persamaan (1) sesuai dengan metode perancangan pada bagian sebelumnya. Data-data tersebut selanjutnya disajikan dalam Tabel 2 dan diagram Clayperon pada Gambar 6.

**Tabel 2.** Data perancangan siklus adsorpsi

Kasus	A	B	C
$T_e$ (°C)	5	3	1
$T_c$ (°C)	37	37	37
$T_1$ (°C)	28	28	28
$T_3$ (°C)	80	80	80
$P_e$ (bar)	0,00873	0,00758	0,00657
$P_c$ (bar)	0,06282	0,06282	0,06282
$X_{max}$	0,3537	0,2960	0,2470
$X_{min}$	0,1753	0,1753	0,1753



**Gambar 6.** Diagram Clayperon hasil simulasi.

Diagram Clayperon pada Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur evaporator yang diinginkan maka garis isoters 1-2 akan semakin bergeser ke kanan. Hal ini disebabkan karena titik 1 (awal pemanasan) ditentukan sama

yaitu 28°C namun masing-masing kasus memiliki tekanan evaporator ( $P_e$ ) yang berbeda.

Jumlah fluida kerja yaitu air yang bersiklus ditentukan sebesar 0,02 kg sehingga jumlah silika gel yang dibutuhkan dapat dihitung dengan persamaan (20). Sedangkan jumlah air yang diam pada silika gel dihitung dengan persamaan (21). Hasil perhitungan disajikan dalam Tabel 3.

$$m_a = \frac{1}{(X_{max} - X_{min})} m_{r,g} \quad (20)$$

$$m_{r,d} = \frac{1}{X_{min}} m_a \quad (21)$$

**Tabel 3.** Perhitungan massa

Kasus	A	B	C
$X_{max}$	0,3537	0,2960	0,2470
$X_{min}$	0,1753	0,1753	0,1753
$m_{r,g}$ (kg)	0,02	0,02	0,02
$m_a$ (kg)	0,1121	0,1656	0,2789
$m_{r,d}$ (kg)	0,0196	0,0290	0,0489
m air	0,0396	0,0490	0,0689
total(kg)			

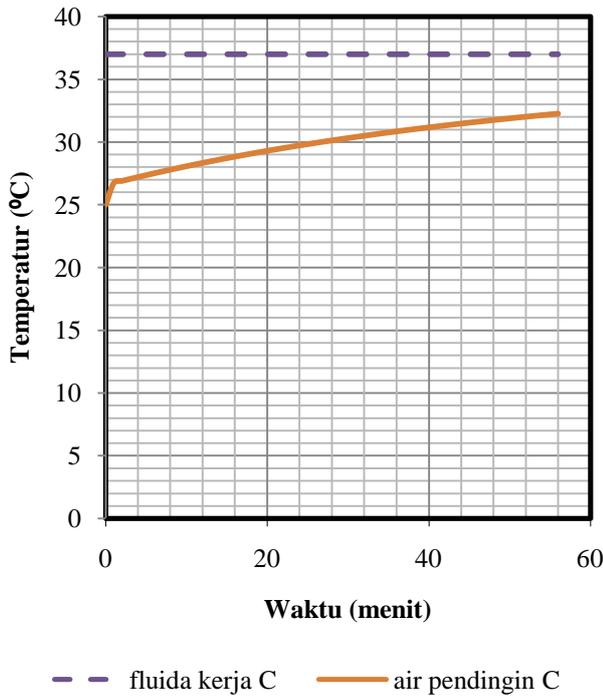
Sesuai dengan Gambar 6, garis isoters untuk kasus dengan temperatur evaporator lebih rendah akan semakin ke kanan. Garis isoters yang lebih kanan menunjukkan bahwa kandungan massa air dalam silika gel semakin sedikit karena semakin ke kanan semakin panas. Hal ini sesuai dengan hasil perhitungan pada Tabel 3 yang menunjukkan bahwa meskipun massa air yang bersiklus sama, massa adsorber dan massa air total dalam pendingin adsorpsi yang dibutuhkan semakin banyak untuk temperatur evaporator yang semakin rendah.

*Simulasi Kondensor*

Temperatur pengembunan fluida kerja pada kondensor ( $T_c$ ) untuk ketiga kasus sebesar 37°C. Besar panas yang harus dibuang melalui kondensor dapat dihitung sebagai berikut.

$$Q_c = m_{r,g} (h_c - h_2) = 0,02(2568,2 - 155,0) = 48,263 \text{ kJ}$$

Kondensor terdiri dari dua batang persegi berlubang (*rectangular hollow bar*). Batang persegi berlubang memiliki tebal 1 mm masing-masing berukuran 6,5 × 6,5 cm dan 6,1 × 6,1 cm (gambar teknik tersedia pada lampiran). Karena perpindahan panas nantinya hanya terjadi dari bagian luar saja, luas area perpindahan panas sama dengan luas permukaan sisi luar batang persegi berlubang 6,5 × 6,5 cm. Dengan konduktivitas termal kuningan sebesar 110 W/m · K [7] dan kondensor dicelupkan dalam 2 kg air bertemperatur awal 25°C, simulasi kenaikan temperatur 2 kg air tersebut akibat menyerap panas dari proses pengembunan fluida kerja ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pada kondensor.

Waktu yang dibutuhkan untuk membuang 48263 J kalor adalah 56 menit.

*Simulasi Evaporator*

Temperatur pendidihan fluida kerja pada evaporator ( $T_c$ ) dibagi menjadi tiga kasus yaitu kasus A 5°C, kasus B 3°C, dan kasus C 1°C. Besar panas yang mampu diserap melalui evaporator dapat dihitung menggunakan persamaan (22). Hasil perhitungan kalor evaporator disajikan pada Tabel 4.

$$Q_e = m_{r,g}(h_1 - h_e) \tag{22}$$

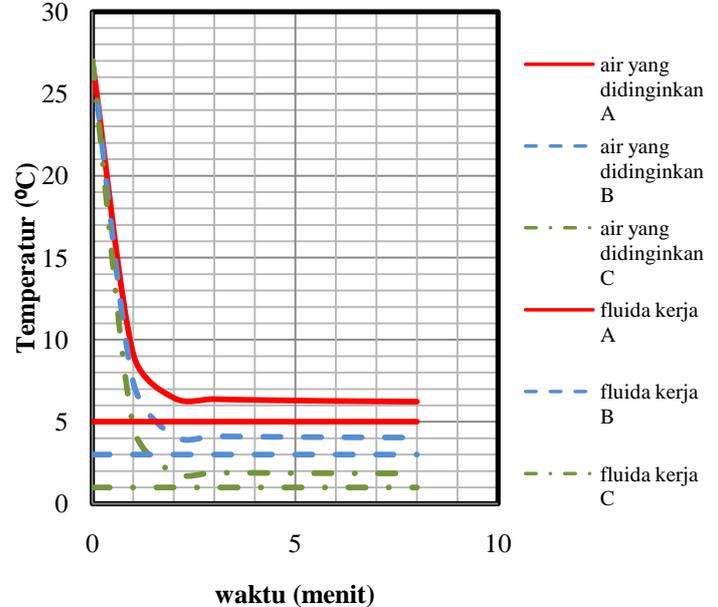
**Tabel 4.** Perhitungan kalor evaporator

Kasus	A	B	C
$T_e$ (°C)	5	3	1
$m_{r,g}$ (kg)	0,02	0,02	0,02
$h_1$ (kJ/kg)	2510,1	2506,4	2502,7
$h_e$ (kJ/kg)	155,0	155,0	155,0
$Q_e$ (kJ)	47,101	47,028	46,955

Nilai entalpi masuk evaporator ( $h_e$ ) sama karena kondisi kondensor dibuat sama sedangkan nilai entalpi keluar evaporator ( $h_1$ ) semakin kecil untuk temperatur evaporator yang semakin rendah.

Evaporator terdiri dari dua batang persegi berlubang (*rectangular hollow bar*). Batang persegi berlubang memiliki tebal 1 mm masing-masing berukuran 5 × 5 cm dan 4,5 × 4,5 cm (gambar teknik tersedia pada lampiran). Karena perpindahan panas

nantinya hanya terjadi dari bagian dalam saja, luas area perpindahan panas sama dengan luas permukaan sisi dalam batang persegi berlubang 4,5 × 4,5 cm. Dengan koefisien konduksi kuningan sebesar 110 W/m · K [7] dan sisi dalam evaporator diisi dengan 0,16 kg air bertemperatur awal 27°C, penurunan temperatur 0,16 kg air tersebut diperoleh akibat terserapnya panas oleh proses pendidihan fluida kerja seperti pada Gambar 8. Metode perhitungan yang digunakan telah dijabarkan dalam bagian sebelumnya.



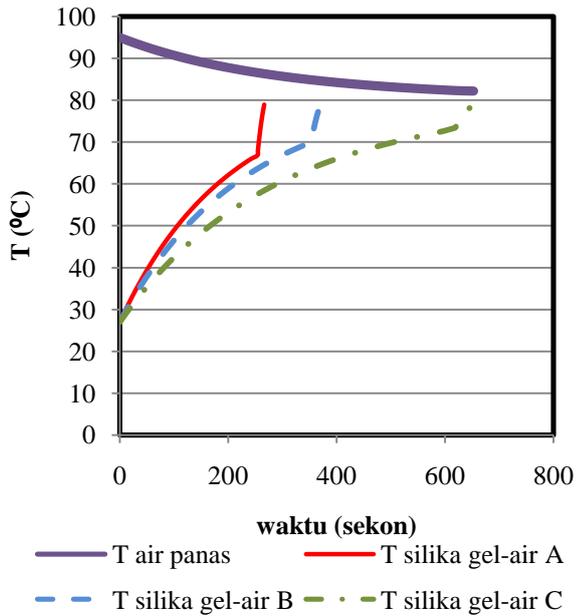
**Gambar 8.** Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pada evaporator.

Waktu yang dibutuhkan 0,16 kg air untuk mencapai temperatur kurang dari 10°C pada kasus A, B, dan C kurang dari 1 menit sedangkan temperatur akhir setelah 8 menit masing-masing 6,2°C, 4,0°C, dan 1,8°C.

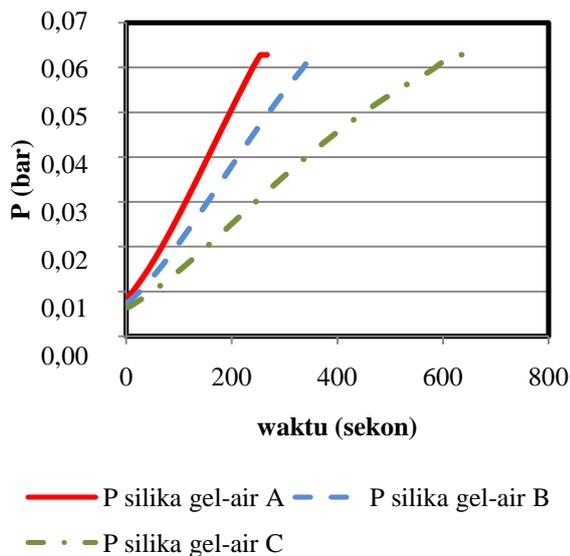
*Simulasi Generator*

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

Pada proses pemanasan dan desorpsi, temperatur awal pemanasan ( $T_1$ ) dan temperatur akhir desorpsi ( $T_3$ ) masing-masing sebesar 28°C dan 80°C. Besarnya temperatur awal dan temperatur akhir ini sama untuk ketiga kasus. Dengan konduktivitas termal kuningan sebesar 110 W/m · K, konduktivitas termal silika gel sebesar 0,174 W/m · K, dan generator dicelupkan ke dalam 4 kg air bertemperatur awal 95°C, perubahan temperatur generator dan 4 kg air panas ketiga kasus dapat ditunjukkan pada Gambar 9.

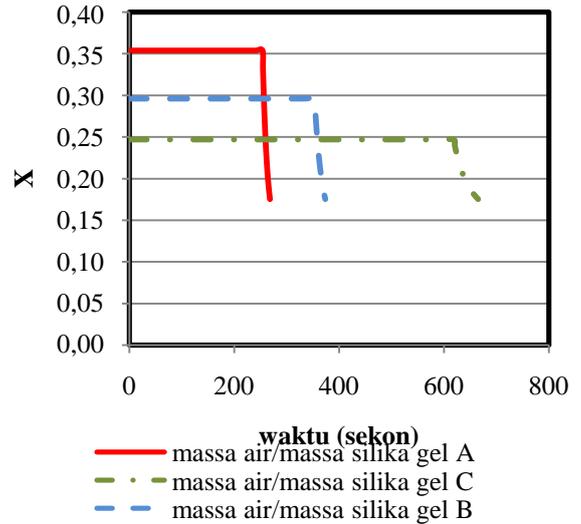


**Gambar 9.** Grafik perubahan temperatur generator dan air panas saat pemanasan dan desorpsi.



**Gambar 10.**Perubahan tekanan silika gel-air saat pemanasan dan desorpsi.

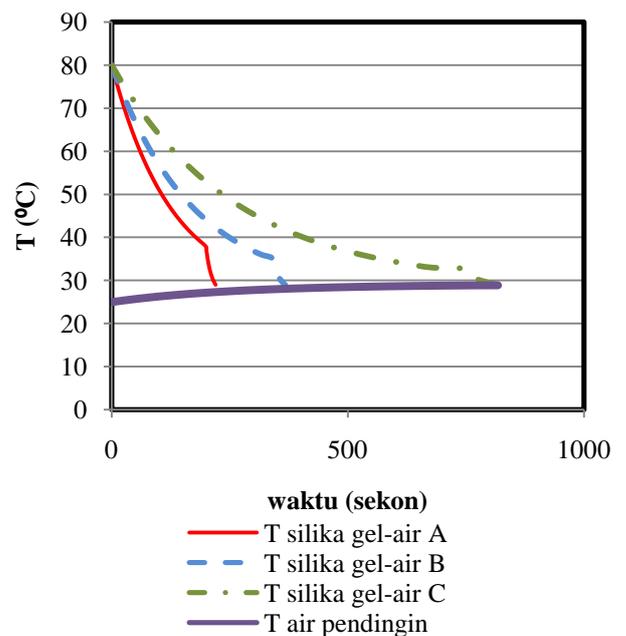
Pada Gambar 9, patahan terlihat pada kurva temperatur silika gel-air. Hal ini disebabkan karena sebelum patahan tersebut terjadi proses pemanasan dengan kandungan massa air dalam silika gel konstan (proses isoters) sedangkan setelah patahan terjadi penurunan massa air dalam silika gel (proses desorpsi), seperti ditunjukkan pada Gambar 9, sehingga kenaikan temperatur menjadi lebih cepat setelah patahan. Grafik ini menunjukkan bahwa kasus C, dengan temperatur evaporator yang lebih rendah, membutuhkan waktu pemanasan dan desorpsi lebih lama daripada kasus A.



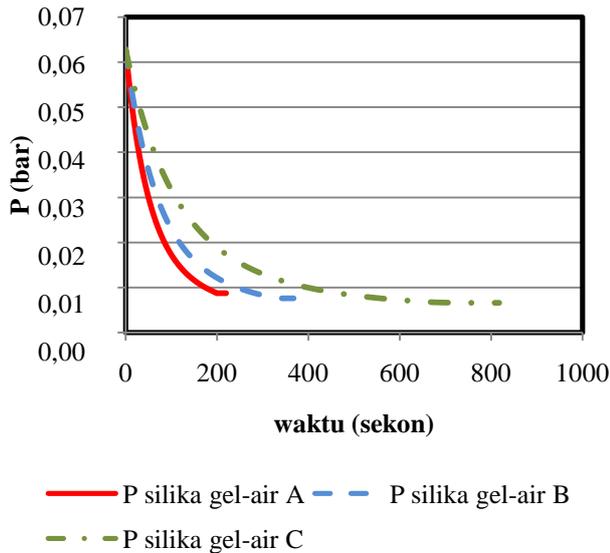
**Gambar 11.**Perubahan massa air dalam silika gel saat pemanasan dan desorpsi.

Proses perubahan tekanan (Gambar 10) dan perubahan massa air yang terkandung dalam silika gel (Gambar 11) merupakan hasil pemodelan menggunakan persamaan (1).

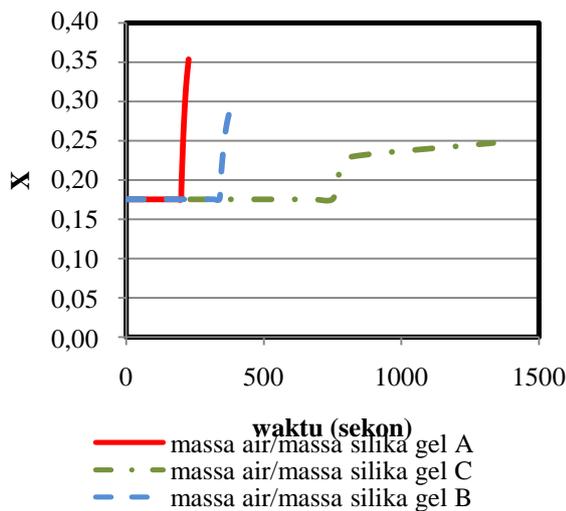
Metode analisis yang digunakan pada proses pendinginan dan adsorpsi sama dengan proses pemanasan dan desorpsi, namun generator dicelupkan dalam 10 kg air bertemperatur awal 25°C. Perubahan temperatur generator dan 10 kg air dingin ketiga kasus ditunjukkan pada Gambar 12. Proses perubahan tekanan ditunjukkan pada Gambar 13 dan perubahan massa air yang terkandung dalam silika gel ditunjukkan pada Gambar 14.



**Gambar 12.**Perubahan temperatur generator dan air panas saat pendinginan dan adsorpsi.



Gambar 13. Perubahan tekanan silika gel-air saat pendinginan dan adsorpsi.



Gambar 14. Perubahan massa air dalam silika gel saat pendinginan dan adsorpsi.

COP Sistem

Kinerja sistem pendingin dapat dihitung menggunakan persamaan (19). Perhitungan kinerja untuk ketiga kasus disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan kinerja

Kasus	$T_e$ (°C)	$Q_e$ (kJ)	$Q_g$ (kJ)	COP
A	5	47,101	123,517	0,38
B	3	47,028	153,203	0,30
C	1	46,955	215,883	0,21

Hasil perhitungan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur evaporator maka semakin rendah nilai COP (*Coefficient of*

*Performance*).

Kesimpulan

Mesin pendingin adsorpsi *intermitten* skala kecil yang mudah dibawa dan dioperasikan oleh satu orang berhasil dirancang. Model mesin pendingin adsorpsi yang dirancang ada tiga model. Model I masih memiliki kelemahan pada desain generator dan model II masih memiliki kelemahan pada desain evaporator dan kondensor. Model III merupakan penyempurnaan dari model I dan II sehingga model III yang dipilih. Dimensi total alat yang dirancang adalah 12,5 cm × 9 cm × 39,5 cm.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada ketiga kasus (kasus A 5°C, kasus B 3°C, dan kasus C 1°C) mampu mendinginkan 160 gram air dari temperatur ruangan 27°C ke temperatur di bawah 10°C. Waktu yang dibutuhkan oleh 0,16 kg air untuk mencapai temperatur kurang dari 10°C pada kasus A, B, dan C kurang dari 1 menit sedangkan temperatur akhir setelah 8 menit masing-masing 6,2°C, 4,0°C, dan 1,8°C dan COP masing-masing 0,38, 0,30, dan 0,21. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur evaporator nilai COP semakin rendah. Sumber panas yang digunakan berasal dari 4 kg air panas bertemperatur awal 95°C. Meskipun massa air yang bersiklus sama yaitu 0,02 kg, massa adsorben dan massa air total dalam pendingin adsorpsi yang dibutuhkan semakin banyak untuk temperatur evaporator yang semakin rendah. Pada kasus A, massa air total 0,0396 kg dengan massa adsorben 0,1121 kg. Sedangkan pada kasus B massa air total 0,0490 kg dengan massa adsorben 0,1656 kg dan kasus C massa air total 0,0689 kg dengan massa adsorben 0,2789 kg.

Saran untuk penelitian berikutnya adalah perlu dilakukan pembuatan prototipe untuk menguji hasil perancangan.

Nomenklatur

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

*Greek letters*

$\Gamma$	laju aliran massa kondensat per unit lebar, kg/s · m
$\delta$	tebal lapisan batas, m
$\Delta T_e$	selisih temperatur permukaan dengan temperatur jenuh
$\mu$	viskositas dinamik, N · s/m <sup>2</sup>
$\rho$	massa jenis, kg/m <sup>3</sup>
$v$	gaya viskos, m <sup>2</sup> /s

*Subscripts*

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

**Referensi**

1. 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).
2. 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](http://www.majalahtambang.com/detail_berita.php?category=18&newsnr=5915), diakses 27 Agustus 2012).
3. R. Boer dan E.J. Bakker, Developing A Silicagel-Water Adsorption Chiller for Microtrigeneration, dipresentasikan pada *9th International IEA Heat Pump Conference*, Zürich, Switzerland, 20-22 Mei 2008 (<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2008/m08043.pdf>, diakses 18 Februari 2012).
4. 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).

5. Wimonnad Charote, *Development of Solid Sorption Refrigeration For Ice-Maker*, Thesis, Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2011.
6. M. R. A. Afonso dan V. Silveira Jr., Characterization of Equilibrium Conditions of Adsorbed Silika-Gel/Air Bed According to Dubinin-Astakhov and Freundlich, *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, **4(1)**:3-7, 2005 (<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/reterm/article/download/3540/2798>, diakses 23 Juli 2012).
7. Incropera, Dewitt, Bergman, dan Lavine, *Introduction to Heat Transfer*, Edisi 6, John Wiley & Sons, New York, 2007.
8. 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).