

KAJIAN EKSPERIMENTAL MESIN PENDINGIN ADSORPSI TENAGA SURYA DENGAN MENGUNAKAN ADSORBEN CAMPURAN

Tulus B. Sitorus

Lektor Kepala
Universitas Sumatera Utara
Departemen Teknik Mesin
PUI Energi Berkelanjutan dan
Biomaterial
tburhanudin@yahoo.com

The purpose of this study was to obtain the performance of the adsorption refrigerator driven by solar energy using mixed adsorbents. The refrigerant used is methanol with 99% purity. The adsorbent used is a mixture of active carbon-active alumina with mass of 7 kg. The type of active alumina used is molecular sieve 13X and the activated carbon used is the ordinary type of coconut shell with 1-3 mm grain size and is produced in the province of North Sumatra. Note that active alumina and activated carbon tested can absorb methanol in the range of 350 ml/kg and 300 ml/kg with a heat source of about 120°C. The test was carried out in the open field exposed to solar radiation from 08.00 WIB until 08.00 WIB the next day for seven cycles. The average of solar radiation ranges from 107.036-214.44 W/m², and the duration of radiation varies from 12.03 to 12.28 hours/day during experiments. The test results also show that the use of mixed adsorbents with methanol adsorbate can produce evaporation temperatures up to about 4,16-13,90°C with a heat source from a temperature of 91.32-97.35°C. The efficiency of collector obtained during testing ranges from 60.09 to 62.26% with maximum solar radiation conditions ranging from 799.40 to 882.76 W/m². The COP value obtained in the range 0.0770-0.1003 with the total daily radiation between 11.245-17.156 MJ/m².

Keywords: adsorption refrigeration, solar energy, mixed adsorbent.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi energi surya yang cukup besar karena terletak di garis khatulistiwa 6°LU sampai 11°LU dan 9°BT-141°BT. Energi surya yang berlimpah tersebut diterima oleh sebagian besar lokasi di Indonesia sepanjang tahun. Total durasi sinar matahari yang diterima seluruh daerah di Indonesia sekitar 2500 jam/tahun dengan radiasi matahari rata-rata adalah 14,5 MJ/m²/hari [1,2]. Salah satu aplikasi pemanfaatan energi surya untuk sistem pendingin adalah mesin adsorpsi. Mesin pendingin dapat beroperasi pada berbagai temperatur sumber panas tanpa ada komponen yang bergerak, tidak mengkonsumsi energi mekanik, sistem kontrol lebih mudah dan biaya pemeliharaan yang rendah [3, 4].

Para pendahulu dalam eksperimen ini adalah Pons dan Guillemot yang melakukan perancangan dan pengujian mesin pendingin adsorpsi yang digerakkan oleh energi surya. Kolektor yang digunakan adalah tipe pelat datar dengan luas 6 m² dan menggunakan adsorben 130 kg karbon aktif dan 18 kg metanol sebagai adsorbat [5, 6]. Dalam kondisi cahaya matahari yang cerah dan lokasi eksperimen adalah daerah Orsay Perancis, diklaim mampu menghasilkan 30-35 kg es per hari. Li [7] melakukan eksperimen dan analisis kinerja mesin pendingin pembuat es menggunakan dua jenis kolektor surya pelat datar dengan luas permukaan 1,5 m². Kolektor diisi dengan karbon aktif sebagai adsorben dan metanol sebagai adsorbat. Percobaan dilakukan di laboratorium dan sinar matahari disimulasikan dengan menggunakan cahaya lampu. Dengan total radiasi 28-30 MJ dari lampu dapat dihasilkan 7-10 kg es. Khattab [8] seorang peneliti di Kairo, juga menggunakan adsorben karbon aktif produk lokal dan metanol serta melakukan modifikasi pada kolektor. Hasil penelitian yang diperoleh adalah 6,9 kg es/m² pada musim dingin dan 9,4 kg es/m² di musim panas. Li [9] mengembangkan mesin pendingin adsorpsi tanpa katup. Jenis kolektor yang digunakan adalah pelat datar dengan luas 1 m² dan mengandung 19 kg karbon aktif, yang diproduksi di Cina dengan kapasitas

penyinaran 18-22 MJ/m² serta menghasilkan 5 kg es. Secara umum, ada empat pasangan kerja adsorben-adsorbat yang biasa digunakan dalam mesin pendingin adsorpsi tenaga surya yaitu karbon aktif-metanol, zeolit-air, silika gel-air dan karbon aktif-amonia [10].

Dalam aplikasinya, siklus pendinginan adsorpsi dapat dibagi kedalam kategori utama yaitu untuk pengkondisian udara (8-15°C), penyimpanan makanan dan vaksin (0-8°C) dan untuk membekukan es dan proses kondensasi (<0°C) [11]. Adsorpsi fisik yang umumnya digunakan dalam mesin pendingin adsorpsi adalah karbon aktif, silika gel dan zeolit [12]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan kinerja mesin pendingin adsorpsi yang digerakkan oleh energi surya dengan menggunakan adsorben campuran karbon aktif-alumina aktif serta metanol sebagai adsorbat.

2. METODE DAN BAHAN

2.1. Metode

Parameter utama untuk mengetahui kinerja mesin pendingin adsorpsi adalah koefisien performansi (COP) dan daya pendinginan spesifik (SCP) [13]. Untuk mesin pendingin adsorpsi tenaga surya umumnya nilai COP bervariasi dari 0,01 - 0,2 yang tergantung pada efisiensi kolektor [14]. Nilai COP dari mesin pendingin adsorpsi yang digerakkan oleh energi surya dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan [15]:

$$COP = \frac{Q_{\text{efek pendinginan}}}{Q_{\text{radiasi}}} \quad (1)$$

dimana $Q_{\text{efek pendinginan}}$ (kJ) dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_{\text{efek pendinginan}} = m_{\text{air}} \cdot c_{p\text{-air}} \cdot (T_{\text{air-max}} - T_{\text{air-min}}) \quad (2)$$

Energi surya yang diterima oleh permukaan kolektor (kJ) diperoleh dari

$$Q_{\text{radiasi}} = I_t \cdot A_c \quad (3)$$

dimana m_{air} adalah massa air (kg), $c_{p\text{-air}}$ adalah panas spesifik air (kJ/kg°C), $T_{\text{air-max}}$ adalah temperatur maksimum air (°C), $T_{\text{air-min}}$ adalah temperatur minimum air (°C), I_t adalah radiasi matahari total (kJ/m²), dan A_c adalah luas permukaan kolektor (m²). Daya pendinginan spesifik merupakan kapasitas pendinginan untuk setiap kilogram adsorben yang dapat dihitung dari persamaan [16]:

$$SCP = \frac{W_L}{m_a} \quad (4)$$

dimana m_a adalah massa adsorben di dalam kolektor (kg). Daya pendinginan (kW) adalah

$$W_L = \frac{(m_{\text{air}} \cdot L_{\text{air}}) + (m_{\text{air}} \cdot c_{p\text{-air}} \cdot T_{\text{air-max}}) - (m_{\text{air}} \cdot c_{p\text{-air}} \cdot T_{\text{air-min}})}{t_c} \quad (5)$$

dimana L_w adalah kalor laten air (kJ/kg) dan t_c adalah lama siklus (detik). Salah satu parameter yang mempengaruhi kinerja mesin pendingin adsorpsi tenaga surya adalah kolektor. Efisiensi kolektor dapat dinyatakan sebagai [17]:

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{radiasi}}}{I_R \cdot A} \quad (6)$$

dimana I_R adalah intensitas radiasi surya (W/m²), dan A adalah luas permukaan kolektor (m²). Besarnya energi radiasi selama penyinaran adalah:

$$Q_{\text{radiasi}} = F \cdot (Q_{\text{masuk}} - Q_{\text{kerugian}}) \quad (7)$$

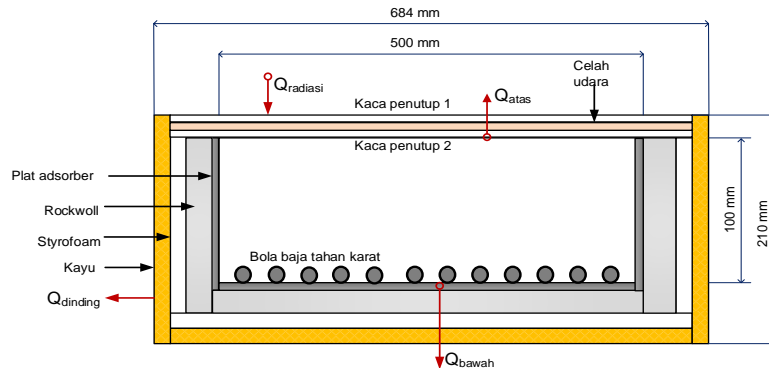
dimana F adalah faktor efisiensi kolektor. Panas masuk yang diterima oleh permukaan kolektor diperoleh dari:

$$Q_{\text{masuk}} = \alpha \cdot \tau \cdot I_R \cdot A \quad (8)$$

dimana τ adalah absorptivitas plat kolektor dan α adalah transmisivitas kaca penutup. Kerugian panas total dari permukaan kolektor adalah:

$$Q_{\text{kerugian}} = Q_{\text{atas}} + Q_{\text{radiasi}} + Q_{\text{dinding}} + Q_{\text{bawah}} \quad (9)$$

dimana Q_{dinding} adalah kerugian panas dari dinding (watt), Q_{bawah} adalah kerugian panas dari penampang bawah kolektor (watt), Q_{atas} adalah kerugian panas dari permukaan atas kolektor (watt), and Q_{radiasi} adalah kerugian panas akibat radiasi. Ketebalan pelat kolektor sebesar 0.001 m dan terbuat dari baja tahan karat seperti ditampilkan Gambar 1.



Gambar 1. Penampang kolektor yang digunakan

Untuk mencegah kehilangan panas dari sisi atas digunakan dua kaca penutup yang dipisahkan oleh celah udara 0,02 m dengan ketebalan 0,003 m. Kolektor berorientasi ke arah Timur dengan sudut kemiringan 30° dan luas penampang $0,25 \text{ m}^2$. Kolektor mengandung adsorben yang dicampur dengan 25 bola kecil dari baja tahan karat. Bola kecil baja tahan karat berdiameter 0,022 m ditujukan untuk meningkatkan proses perpindahan panas pada adsorben. Permukaan luar kolektor diisolasi menggunakan kayu, styrofoam, dan rockwool. Bahan isolasi dibuat dengan ketebalan sekitar 0,09 m untuk mencegah kehilangan panas saat kolektor menerima radiasi matahari. Adsorben yang digunakan adalah campuran karbon aktif -alumina aktif dengan komposisi yang sama sebanyak 7 kg. Tipe alumina aktif yang digunakan adalah molecular sieve 13X dan karbon aktif yang digunakan tipe biasa dari tempurung kelapa berbentuk butiran (*granular*) dengan ukuran butir 1-3 mm dan diproduksi di provinsi Sumatera Utara. Gambar 2 menunjukkan kolektor yang telah diisi dengan adsorben campuran.



Gambar 2. Kolektor diisi oleh adsorben campuran

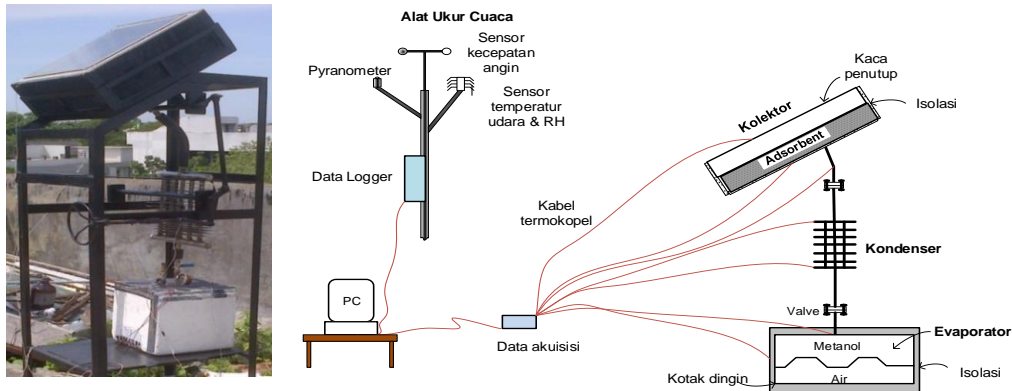
Sebagai catatan bahwa alumina aktif dan karbon aktif yang diuji dapat menyerap metanol masing-masing berkisar 350 ml/kg dan 300 ml/kg dengan sumber panas sekitar 120°C [18]. Adsorbat atau refrigeran yang digunakan adalah metanol sebanyak tiga liter dengan kemurnian 99%. Media yang didinginkan adalah air dengan volume lima liter.

2.2. Skema Eksperimental

Gambar 3 menunjukkan desain eksperimen yang dilakukan dan mesin pendingin adsorpsi yang dirakit. Secara umum, mesin pendingin adsorpsi tenaga surya terdiri dari kolektor atau adsorber, kondensor, dan evaporator. Dalam pengujian ini, tipe kolektor yang digunakan adalah pelat datar karena mudah dipabrikasi dan umumnya digunakan dalam sistem pendingin adsorpsi tenaga surya [19, 20].

Massa adsorben yang dibutuhkan berkisar $20\text{-}26 \text{ kg/m}^2$ untuk luas kolektor yang digunakan [21]. Kondensor terbuat dari baja tahan karat dengan 17 sirip, sehingga luas total permukaan perpindahan panas

0,85 m² dan berfungsi untuk mengkondensasi uap adsorbat yang berasal dari kolektor. Kondensor dan kolektor didinginkan secara konveksi alami. Komponen evaporator dirancang berbentuk empat sel trapezoidal, yang bertujuan untuk meningkatkan efek perpindahan panas. Evaporator terbuat dari baja tahan karat dan diisi dengan metanol sebanyak 3 liter dan ditempatkan di dalam kotak dingin yang sudah diisolasi. Kotak dingin diisi dengan air sebanyak 4,5 liter dan diisolasi dengan styrofoam dan rockwool. Pipa fleksibel dengan diameter 0,02 m digunakan sebagai penghubung kolektor, kondensor, dan evaporator. Kabel termokopel yang terhubung dengan sistem akuisisi data Agilent 3497A ditempatkan pada komponen mesin pendingin.



Gambar 3. Mesin pendingin adsorpsi dan skema eksperimental

Untuk mengukur temperatur komponen mesin pendingin maka digunakan tipe termokopel J dengan akurasi $\pm 0,4\%$. Alat pengukur tekanan Pace XR5 tipe P1600 dengan akurasi $\pm 2\%$ dipasang pada mesin pendingin adsorpsi untuk mengukur tekanan kerja yang terjadi selama proses berlangsung. Peralatan data HOBO micro station digunakan untuk merekam kondisi cuaca seperti intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, kelembapan relatif dan kecepatan angin. Secara ringkas, prosedur eksperimental dapat dijelaskan sebagai berikut. Proses pemanasan hingga desorpsi dilakukan dengan menggunakan radiasi surya dari pukul 08.00 WIB - 05.00 WIB. Selanjutnya dilakukan proses vakum sekitar 30 menit. Proses pemvakuman dilakukan untuk mengevakuasi udara di dalam mesin pendingin karena keberadaan udara mempengaruhi siklus termodinamika dari adsorbat. Kemudian dilakukan proses pengisian cairan metanol ke dalam evaporator melalui saluran pipa yang telah dibuat. Setelah itu, proses adsorpsi terjadi mulai sore hari. Pengujian dilakukan di kota Medan pada bulan November 2017.

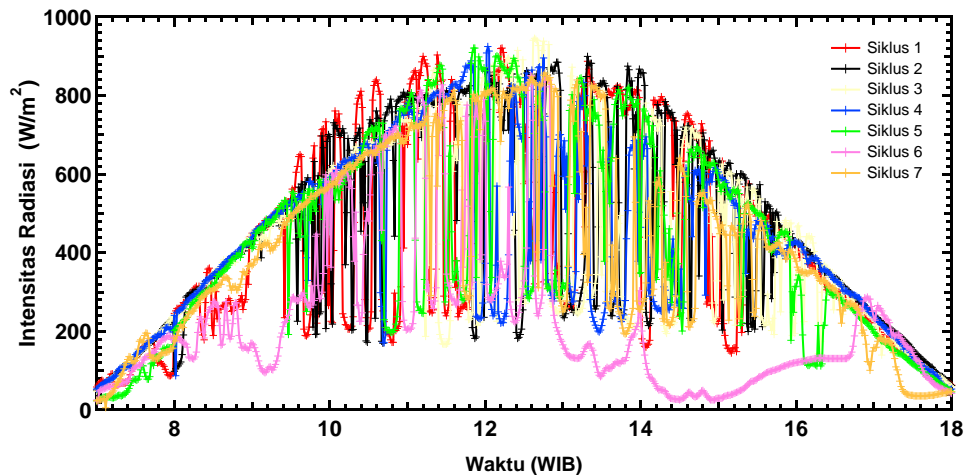
3. HASIL DAN DISKUSI

Pengujian dilakukan dilapangan terbuka yang terkena paparan radiasi matahari dari pukul 08.00 WIB hingga pukul 08.00 WIB keesokan harinya selama tujuh siklus. Tabel 1 menunjukkan parameter cuaca selama proses pengujian di kota Medan. Besarnya radiasi matahari rata-rata berkisar 107,036-214,44 W/m² dan lama penyinaran berkisar 12,03-12,28 jam/hari selama pengujian. Data eksperimental menunjukkan bahwa radiasi matahari mulai tampak mulai pukul 06.23 WIB hingga 18.42 WIB.

Tabel 1: Kondisi cuaca selama pengujian.

SIKLUS	WAKTU PENGUJIAN NOVEMBER 2017	RADIASI RATA-RATA (W/m ²)	LAMA PENYINARAN (jam/hari)	TEMPERATUR UDARA RATA-RATA (°C)	KELEMBAPAN RELATIF RATA-RATA (%)	KECEPATAN ANGIN RATA-RATA (m/s)
1	14 - 15	195.19	12.28	28.95	76.95	0.41
2	15 - 16	214.44	12.2	29.5	72.3	1.12
3	16 - 17	191.68	12.23	29.4	75.83	0.26
4	17 - 18	199.07	12.26	29.77	75.35	1.06
5	18 - 19	198.57	12.07	30.47	74.79	1.7
6	19 - 20	107.04	12.09	28.23	80.81	0.13
7	20 - 21	195.67	12.03	30.18	76.5	0.44

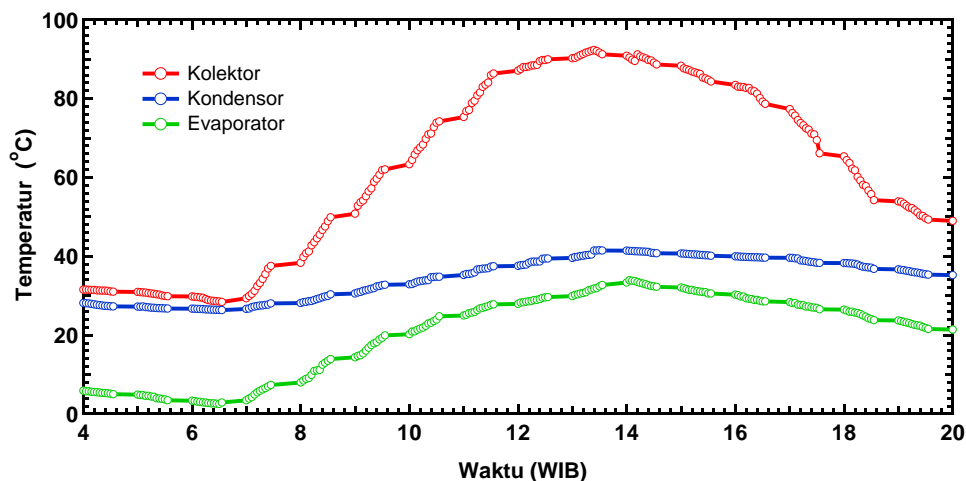
Berdasarkan data eksperimen bahwa radiasi matahari maksimum umumnya terjadi pada pukul 11.51 WIB-13.19 WIB dan temperatur udara maksimum pada pukul 12.36 WIB-14.40 WIB. Gambar 4 menunjukkan kondisi intensitas radiasi surya selama tujuh siklus pertama. Intensitas radiasi maksimum sebesar $945,60 \text{ W/m}^2$ terjadi pada siklus ketiga.



Gambar 4. Kondisi intensitas radiasi selama pengujian

3.1. Tekanan kerja dan temperatur komponen mesin pendingin

Dalam prakteknya, temperatur kolektor cukup bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan, terutama parameter radiasi matahari. Dalam pengujian ini, temperatur kolektor maksimum dapat dicapai $97,35^\circ\text{C}$ pada siklus ketiga saat proses desorpsi. Gambar 5 menunjukkan distribusi temperatur komponen mesin pendingin pada siklus pertama.



Gambar 5. Distribusi temperatur dari komponen mesin pendingin

Data eksperimen menunjukkan bahwa proses pemanasan hingga desorpsi terjadi berkisar 9 jam dan proses pendinginan hingga adsorpsi terjadi selama 15 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi tekanan kerja dari proses desorpsi ke adsorpsi mulai dari $0,0576$ - $0,3454$ bar seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan kondisi temperatur evaporator selama pengujian dimana temperatur minimum yang dapat dicapai selama proses adsorpsi adalah $4,16^\circ\text{C}$ dari temperatur desorpsi $26,32^\circ\text{C}$. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa penggunaan adsorben campuran dengan adsorbat metanol dapat menghasilkan temperatur penguapan hingga sekitar $4,16$ - $13,90^\circ\text{C}$ dengan sumber panas dari temperatur $91,32$ - $97,35^\circ\text{C}$. Besarnya efisiensi kolektor yang diperoleh selama pengujian berkisar $60,09$ - $62,26\%$ dengan kondisi radiasi matahari maksimum berkisar $799,40$ - $882,76 \text{ W/m}^2$ seperti yang ditunjukkan Tabel 3.

Tabel 2: Tekanan kerja dan temperatur evaporator selama pengujian

SIKLUS	TEMPERATUR EVAPORATOR (°C)		TEKANAN KERJA (bar)	
	Desorpsi	Adsorpsi	Desorpsi	Adsorpsi
1	25.56	5.46	0.3389	0.0734
2	26.83	9.67	0.3235	0.0652
3	26.9	8.5	0.3333	0.0664
4	26.47	8.22	0.3367	0.0706
5	26.32	4.16	0.3454	0.0821
6	25.31	13.9	0.3021	0.0576
7	26.42	5.38	0.3392	0.0725

Tabel 3: Efisiensi kolektor selama pengujian

SIKLUS	RADIASI MAKSIMUM (W/m ²)	TEMPERATUR KOLEKTOR (°C)	EFISIENSI KOLEKTOR (%)
1	821.5	94.47	61.54%
2	799.4	91.32	61.75%
3	882.76	97.35	61.80%
4	824.4	96.09	60.09%
5	820.6	94.28	61.09%
6	850.6	96.32	61.86%
7	856.9	97.25	62.26%

3.2. Performansi Mesin Pendingin Adsorpsi

Besarnya nilai COP yang diperoleh berada di kisaran 0,0770-0,1003 dengan radiasi total harian berada di antara 11,245-17,156 MJ/m² seperti tampak pada Tabel 4. Data hasil pengujian juga menunjukkan bahwa semakin besar energi matahari yang diterima oleh kolektor maka semakin tinggi nilai COP yang diperoleh. Untuk nilai maksimum COP mesin pendingin sebesar 0,1003 diperoleh temperatur evaporator 4,16°C dan temperatur kolektor 94,28°C. Jumlah radiasi total harian yang diterima oleh permukaan kolektor berkisar 2811,99 -4289,10 kJ dan efek pendinginan yang dihasilkan dari proses adsorpsi sebesar 216,59-430,16 kJ selama pengujian. Selain itu, nilai SCP maksimum diperoleh 34,103 W/kg dan nilai minimum SCP 31,895 W/kg.

Tabel 4: Nilai COP dan SCP yang diperoleh selama pengujian

Siklus	Radiasi Total Harian (MJ/m ²)	Q _{efek pendinginan} (kJ)	Q _{radiasi} (kJ)	SCP (W/kg)	COP
1	16.864	370.06	4216.1	33.16	0.0878
2	16.307	325.08	4076.82	32.38	0.0797
3	16.561	347.57	4140.23	32.57	0.0839
4	16.705	354.56	4176.33	32.91	0.0849
5	17.156	430.16	4289.1	34.10	0.1003
6	11.245	216.59	2811.99	31.89	0.0770
7	16.906	400.11	4226.46	33.46	0.0947

Dari analisis yang dilakukan diperoleh bahwa kinerja mesin pendingin adsorpsi tenaga surya dipengaruhi oleh radiasi total setiap hari, efisiensi kolektor dan proses pemvakuman. Pertama, fluktuasi radiasi total setiap hari dipengaruhi oleh kondisi langit seperti cerah, mendung dan hujan. Radiasi total matahari yang diterima oleh kolektor dalam setiap siklus umumnya membuat temperatur kolektor di bawah 100°C sehingga menurunkan kemampuan adsorben untuk melepaskan adsorbat saat proses desorpsi. Data eksperimental juga menunjukkan bahwa semakin tinggi radiasi total harian yang diterima oleh kolektor maka semakin tinggi nilai COP yang diperoleh. Kedua, proses vakum yang dilakukan selama pengujian turut mempengaruhi kinerja mesin pendingin. Sebagai catatan, pendinginan adsorpsi tenaga surya yang menggunakan metanol sebagai adsorbat memiliki rentang tekanan kerja normal berkisar dari 0,02-0,2 bar. Berdasarkan data pengujian diperoleh bahwa tekanan kerja mesin pendingin adsorpsi sekitar 0,0576-0,3454 bar. Hal ini berarti bahwa tekanan kerja mesin pendingin yang diuji belum sesuai yang diharapkan. Masalah ini terutama disebabkan oleh proses pemvakuman yang masih belum optimal sehingga mengakibatkan adanya udara di dalam mesin pendingin. Keberadaan udara mempengaruhi tekanan kerja dan siklus termodinamika di dalam mesin pendingin. Perlu diingat bahwa ukuran rata-rata adsorben mikropori sekitar 20 Angstrom cukup mampu menyerap tidak hanya adsorbat tetapi juga gas yang tidak diinginkan seperti infiltrasi udara. Diperkirakan bahwa udara menempati bagian dari permukaan mikro adsorben yang seharusnya diisi oleh adsorbat. Keberadaan udara yang memiliki tekanan saturasi yang lebih tinggi daripada adsorbat pada temperatur yang sama akan merusak proses vakum dan mengurangi kinerja mesin pendingin adsorpsi. Sehingga jumlah adsorbat yang diserap oleh adsorben akan berkurang akibat keberadaan udara. Udara teradsorpsi lebih awal dari adsorbat dan membuat mikropori adsorben menjadi lebih tersedia untuk adsorbat selama proses pemanasan. Selain itu, tekanan kerja mesin pendingin terus meningkat karena peningkatan temperatur kolektor karena udara tidak dapat terkondensasi. Akibatnya, jumlah adsorbat yang teradsorpsi akan berkurang dari sebelumnya. Ketiga, selama proses pendinginan, diperlukan temperatur kolektor serendah mungkin agar adsorben mampu menyerap seluruh adsorbat saat proses adsorpsi.

4. KESIMPULAN

Kinerja mesin pendingin adsorpsi tenaga surya telah berhasil diuji dengan menggunakan adsorben campuran karbon aktif-alumina aktif. Data eksperimental menunjukkan bahwa kinerja mesin pendingin adsorpsi dipengaruhi oleh radiasi matahari dan performansi kolektor. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efisiensi kolektor maksimum diperoleh sebesar 62,26% saat temperatur kolektor 97,25°C. Data eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan adsorben campuran tersebut dapat menghasilkan temperatur evaporator berkisar 4,16°C-13,90°C dimana temperatur sumber panas sekitar 91,32-97,35°C. Untuk peningkatan proses perpindahan panas dan massa pada adsorben diperlukan penelitian lanjutan mengenai bahan adsorben dan efisiensi kolektor agar dapat meningkatkan performansi mesin pendingin adsorpsi tenaga surya.

5. PERNYATAAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Energi Surya dan Laboratorium Teknik Pendingin Universitas Sumatera Utara atas bantuan fasilitas yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] SITORUS, T.B., *et al.*, "Experimental Study of Solar Refrigerator System Using Activated Alumina and Methanol Adsorption Pair", *International Journal of Technology, IJTech Journal*, v. 7, n. 5, pp. 910-920, 2016.
- [2] SITORUS T.B. *et al.*, "A Study on Adsorption Refrigerator Driven by Solar Collector Using Indonesian Activated Carbon". *J. Eng. Technol. Sci.*, v. 49, n. 5, pp. 657-670, 2017.
- [3] WANG Y. *et al.*, "Experimental investigation of a solar-powered adsorption refrigeration system with the enhancing desorption", *Energy Conversion and Management*, v. 155, pp. 253-261, Jan. 2018.
- [4] AZIZ, C.Y.A, FIRDAUS, R., Pemanfaatan Panas di Pipa Tekanan Tinggi pada Mesin Pendingin (AC)", *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 9, n.1, pp. 15-21, 2018.
- [5] MAHESH, A., "Solar collectors and adsorption materials aspects of cooling system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.73, pp. 1300-1312, Jun. 2017.
- [6] RASHIDI, S., *et al.*, "A review on the applications of porous materials in solar energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 73 pp. 1198-1210, Jun. 2017.
- [7] LI, M. *et al.*, "Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for the ice maker". *Renewable Energy*, 27, n. 2, pp. 211-221, Oct. 2002.
- [8] KHATTAB, M.N., "A novel solar-powered adsorption refrigeration module", *Applied Thermal*

Engineering, 24, n. 17-18, pp. 2747-2760, Dec. 2004.

- [9] LI M., *et al.*, “Development of no valve solar ice maker”, *Applied Thermal Engineering*, v. 24, n.5-6, pp. 865-872, Apr. 2004.
- [10] SINGH, V.K., KUMAR A.E., “Experimental investigation and thermodynamic analysis of CO₂ adsorption on activated carbons for cooling system”, *Journal of CO2 Utilization*, v. 17, pp. 290-304, Jan. 2017.
- [11] SITORUS, T.B., *et al.*, “Performance Analyses of Solar Adsorption Refrigeration System Using Indonesian Activated Carbon and Methanol as Working Pair”, *Proceeding of the 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering*, pp. 588-596, Prague, Sep. 2016.
- [12] BRITES, N.J.V.G., *et al.*, “Influence of the design parameters on the overall performance of a solar adsorption refrigerator”, *Renewable Energy*, v. 86, pp.238 -250, Feb. 2016.
- [13] WANG, W.L., *et al.*, “A Review on Adsorption Working Pairs for Refrigeration”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 3, pp. 518-534, Apr. 2009.
- [14] YOUNES, M. M., *et al.*, “A review on adsorbent-adsorbate pairs for cooling applications”. *Applied Thermal Engineering*, v. 114, pp. 394-414, Mar. 2017.
- [15] HADJ AMMAR, M.A., *et al.*, “Thermodynamic analysis and performance of an adsorption refrigeration system driven by the solar collector”, *Applied Thermal Engineering*, v. 112, pp.1289-1296, Feb. 2017.
- [16] HAMZA, A., ALI H., “Performance assessment and gained operational experiences of a residential scale solar thermal driven adsorption cooling system installed in the hot, arid area”, *Energy and Buildings*, v. 138, pp.271-279, Mar. 2017.
- [17] DUFFIE, J.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3 ed, New York, Wiley, 2006.
- [18] AMBARITA, H., ”The Adsorption Capacity of Activated Carbon and Activated Alumina as Adsorbent Against Refrigerants in Adsorption Cycle”, *Proceedings of the National Seminar, Mechanical Engineering - University of Indonesia (SNTTM XIII)*, pp. 300-306, Jakarta, Oct. 2014
- [19] T.B., SITORUS, *et al.*, “Performance of the natural cooler to keep the freshness of vegetables and fruits in Medan City”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 309,
- [20] KUMMER, H., *et al.*, “Thermally driven refrigeration by methanol adsorption on coatings of HKUST-1 and MIL-101(Cr)”, *Applied Thermal Engineering*, v. 117, pp. 689-697, May 2017.
- [21] ERIC. H.J., “A Study of Thermal Decomposition of Methanol In Solar-Powered Adsorption Refrigeration Systems”, *Solar Energy*, v. 62, n.5, pp. 325 -329, May 1998.