

Performansi Mesin Pendingin Adsorpsi Tenaga Matahari Dengan Adsorben Campuran Karbon Aktif dan Alumina Aktif

Tulus Burhanuddin Sitorus^{1,a*}, Farel H. Napitupulu^{2,b}, Himsar Ambarita^{3,c}

^{1a,2b,3c} Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik USU – Indonesia

Jl. Politeknik Kampus USU Medan - 20155, Telp. (061) 8213250

^atburhanudin@yahoo.com, ^bfarel@yahoo.com, ^chimsar-a@yahoo.com

Abstrak

Salah satu penerapan dari pemanfaatan tenaga matahari adalah mesin pendingin adsorpsi. Dapat dikatakan bahwa penelitian mengenai mesin pendingin adsorpsi tenaga matahari masih jarang dilakukan di Indonesia. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh performansi suatu mesin pendingin adsorpsi dengan sumber energi panas dari matahari. Pengujian dilakukan selama sepuluh siklus dimana satu siklus lamanya 24 jam. Kondisi cuaca selama pengujian dilakukan cukup bervariasi. Mesin pendingin adsorpsi ini menggunakan adsorben campuran karbon aktif - alumina aktif dan refrijeran metanol sebanyak dua liter. Air sebagai media yang didinginkan digunakan sebanyak 3,5 liter. Kolektor yang digunakan jenis plat datar dengan luas penampang $0,25 \text{ m}^2$ serta sudut kemiringan kolektor 30° . Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai performansi *coefficient of performance* (COP) maksimum adalah 0,0876 pada total energi radiasi matahari $3,7358 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dan nilai COP minimum diperoleh 0,0687 pada total energi radiasi matahari $4,8044 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Temperatur air paling rendah yang dapat dicapai pada pengujian ini adalah $4,32^\circ\text{C}$ dari temperatur awal air sebesar $25,42^\circ\text{C}$.

Kata Kunci : tenaga matahari, mesin pendingin adsorpsi, performansi

Latar Belakang

Peningkatan konsumsi energi Indonesia meningkat secara historikal rata-rata 3,09% per tahun dari tahun 2000 sampai dengan 2010 dimana jumlahnya meningkat dari 737 juta SBM (2000) menjadi 1012 juta SBM (2010). Sejalan dengan konsumsi energi yang meningkat, maka penyediaan energi primer maupun final mengikuti kenaikan tersebut. Namun demikian, peningkatan penyediaan energi sangat mengandalkan pembangunan infrastruktur energi seperti pembangkit listrik, kilang minyak, pelabuhan, dan sebagainya yang memerlukan pendanaan yang cukup besar dan hal ini sering menjadi kendala utama [1]. Dengan mempertimbangkan kondisi di atas maka sangat perlu dikembangkan energi terbarukan sebagai alternatif. Disamping itu pemakaian energi terbarukan yang ramah lingkungan juga berarti menyelamatkan lingkungan hidup dari berbagai dampak buruk yang ditimbulkan akibat penggunaan bahan bakar minyak (BBM). Beberapa energi terbarukan yang dapat diaplikasikan adalah bioetanol, biodiesel, energi panas bumi, mikrohidro, energi angin, dan energi matahari. Khusus untuk energi matahari, keberadaannya cukup potensial di Indonesia. Hal

ini dapat dilihat dari posisi astronomi negara Indonesia di peta dunia. Dengan letak Indonesia yang berada pada daerah khatulistiwa, yaitu pada lintang 6° Lintang Utara (LS) - 11° Lintang Selatan (LS) dan 95° Bujur Timur (BT) - 141° Bujur Timur, dan dengan memperhatikan peredaran matahari dalam setahun yang berada pada daerah $23,5^\circ$ LU dan $23,5^\circ$ LS maka wilayah Indonesia akan selalu disinari matahari selama 10 - 12 jam dalam sehari. Karena letak Indonesia berada pada daerah khatulistiwa maka Indonesia memiliki tingkat radiasi matahari yang cukup tinggi. Menurut [2] bahwa diperkirakan rata-rata intensitas radiasi matahari yang jatuh pada permukaan bumi Indonesia adalah $4,8 \text{ kWh/m}^2 / \text{hari}$.

Salah satu pemanfaatan tenaga matahari adalah mesin pendingin siklus adsorpsi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performansi suatu mesin pendingin adsorpsi dengan memanfaatkan energi terbarukan yaitu energi matahari yang gratis dan tidak polutif. Diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) serta sebagai alternatif mesin pendingin tanpa energi listrik.

Riset Internasional

Pelopor di bidang riset ini adalah Pons dan Guillminot [3] yang melakukan perancangan dan pengujian mesin pembuat es yang digerakkan oleh tenaga matahari. Kolektor matahari yang digunakan adalah tipe plat datar dengan luas bidang penyerapan 6 m^2 yang mengandung 130 kg karbon aktif dan metanol sebagai refrigeran sebanyak 18 kg. Pada kondisi sinar matahari yang baik dan lokasi pengujian ada di daerah Orsay Francis, diklaim dapat menghasilkan 30-35 kg es per hari. Selanjutnya peneliti [4] melakukan pengujian performansi dan analisis mesin pembuat es dengan menggunakan solar kolektor tipe dua plat datar dengan total luas penampang $1,5 \text{ m}^2$. Kolektor diisi dengan karbon aktif sebagai adsorben dan metanol sebagai refrigeran. Pengujian dilakukan di laboratorium dan sinar matahari disimulasikan dengan menggunakan lampu quartz. Dengan total radiasi dari lampu sebesar 28-30 MJ dapat dihasilkan 7-10 kg es. Peneliti [5] melakukan penelitian di Kairo, juga menggunakan pasangan karbon aktif produk lokal dan metanol serta melakukan modifikasi pada kolektor. Hasil yang didapatkan adalah 6.9 kg es/m^2 pada musim dingin dan 9.4 kg es/m^2 pada musim panas. Selanjutnya peneliti [6] melakukan pengembangan mesin pembuat es tanpa menggunakan katup. Kolektornya adalah tipe plat datar dengan luas 1 m^2 dan mengandung 19 karbon aktif yang diproduksi di China dimana dengan kapasitas penyimpanan sebesar $18-22 \text{ MJ/m}^2$ didapatkan es sebanyak 5 kg.

Performansi Mesin Pendingin Adsorpsi

Besarnya nilai COP (*coefficient of performance*) mesin pendingin adsorpsi bergantung kepada kondisi cuaca dan efisiensi tiap komponen sistem dimana harganya bervariasi dari 0,01 hingga 0,2 [7]. Menurut [8] bahwa ada empat pasangan utama adsorben-adsorbat yang umum digunakan dalam sistem pendingin adsorpsi tenaga surya yaitu karbon aktif dan metanol, zeolit - air, silika gel - air serta karbon aktif dan amonia. Untuk aplikasi dari mesin pendingin adsorpsi ini menurut [9] dapat dibedakan atas tiga kategori yaitu untuk pendingin udara ruangan ($8^\circ\text{C}-15^\circ\text{C}$), untuk refrigerasi makanan dan penyimpanan vaksin ($0^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}$) dan untuk proses pembekuan es dan tujuan pengentalan ($< 0^\circ\text{C}$). Sedangkan menurut [10] bahwa adsorben fisik yang umum digunakan pada refrigerasi adsorpsi adalah karbon aktif, silika gel dan zeolit.

Menurut [11] bahwa nilai COP mesin pendingin adsorpsi yang digerakkan tenaga matahari dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$COP = \frac{Q_s}{Q_{solar}} \quad (1)$$

dimana :

$$Q_s = m_w \cdot cp_w \cdot \Delta T_w \quad (2)$$

dan

$$Q_{solar} = G_i \cdot A \quad (3)$$

Sedangkan menurut [12] bahwa SCP (*specific cooling power*) merupakan kapasitas pendinginan untuk tiap kilogram massa adsorben yang dapat dihitung dari :

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

dimana daya pendinginan adalah

$$W_L = \frac{(m_w \cdot L_w) + (m_w \cdot cp_w \cdot T_{wi}) - (m_w \cdot cp_w \cdot T_{wf})}{t_c} \quad (5)$$

Metodologi Penelitian

Tempat dan Waktu. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Energi Surya Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara dari tanggal 6 Juni 2014 sampai dengan 16 Juni 2014.

Bahan. Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah :

- Campuran karbon aktif dan alumina aktif sebagai adsorben sebanyak 6,5 kg
- Metanol sebagai adsorbat atau refrigeran dengan kemurnian 99,9% sebanyak 2 liter
- Air sebagai media yang didinginkan sebanyak 3,5 liter

Alat Ukur. Untuk mengukur intensitas radiasi matahari digunakan pyranometer yang terdapat pada alat ukur cuaca *Data HOBO Station* yang dipasang Gedung Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik USU. Dan untuk merekam data distribusi temperatur pada setiap komponen maka digunakan sistem data akuisisi. Sedangkan pompa vakum digunakan untuk memvakumkan mesin pendingin. Disamping itu digunakan juga alat ukur tekanan untuk mengukur perubahan tekanan di dalam mesin pendingin.

Skema Pengujian. Komponen-komponen mesin pendingin adsorpsi yang dirancang bangun terdiri dari kolektor, kondensor dan evaporator seperti tampak pada gambar 1. Sedangkan spesifikasi

mesin pendingin ditunjukkan oleh tabel 1. Kolektor yang digunakan adalah tipe plat datar dan jenis ini umumnya digunakan pada sistem pendingin adsorpsi tenaga matahari [13]. Jumlah massa adsorben yang digunakan disesuaikan dengan luas permukaan kolektor dimana menurut [1] bahwa untuk setiap 1 m² luas kolektor diperlukan adsorben sebanyak 20 - 26 kg.

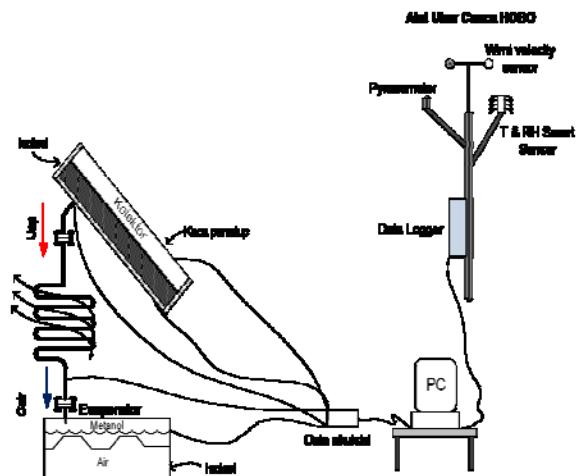


Gambar 1. Mesin pendingin

Tabel 1. Spesifikasi mesin pendingin

No	Data	Keterangan
1	Kolektor	tipe plat datar, luas penampang 0,25 m ² , sudut kemiringan 30°
2	Kondensor	stainless steel, menggunakan sirip
3	Evaporator	stainless steel, volume refrigeran 2 liter
4	Adsorben	campuran karbon aktif - alumina aktif
5	Refrigeran	metanol dengan kadar kemurnian 99,9%
6	Sumber panas	radiasi matahari

Pada gambar 2 tampak skema pengujian yang dilakukan. Mesin pendingin tersebut dihubungkan dengan alat akuisisi data melalui kabel termokopel yang ditempatkan pada kolektor, kondensor, evaporator dan air. Data akuisisi akan menampilkan distribusi temperatur yang terjadi saat pengujian berlangsung pada komponen mesin pendingin dan air serta langsung terhubung ke komputer. Sedangkan alat ukur tekanan dipasang pada kolektor serta diantara kondensor dan evaporator pada mesin pendingin.



Gambar 2. Skema pengujian [14, 15]

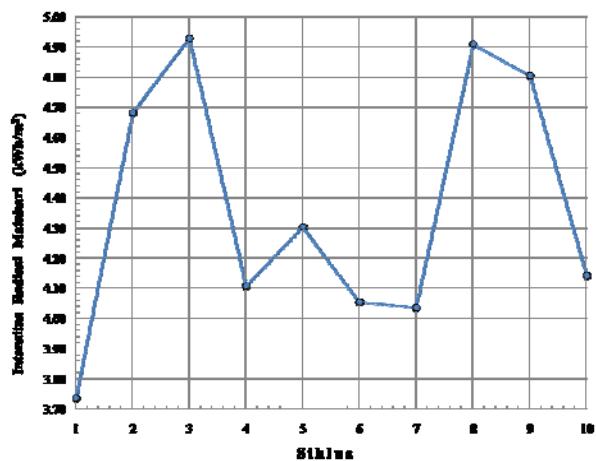
Pengolahan dan Analisa Data. Metode pengumpulan data terdiri dari :

- Data primer merupakan data yang diperoleh berdasarkan pengukuran yang dilakukan di lokasi pengujian yaitu kondisi cuaca serta perubahan temperatur setiap komponen serta air yang didinginkan selama proses adsorpsi dan desorpsi.
 - Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari literatur atau sumber data lain yang terkait.
- Selanjutnya data yang diperoleh dari hasil pengukuran dan pengujian diolah dan dianalisa.

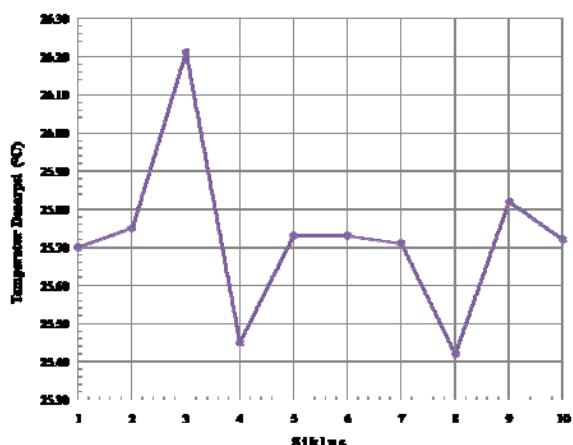
Pembahasan

Sebelum dilakukan pengujian performansi mesin pendingin maka telah dilakukan pengujian kapasitas adsorpsi dari adsorben yang akan digunakan. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa untuk volume satu liter metanol maka yang dapat diserap atau diadsorpsi oleh satu kilogram campuran karbon aktif dan alumina aktif sebesar 0,3 liter. Sedangkan untuk pengujian performansi mesin pendingin dilakukan mulai jam 08.00 WIB pagi sampai dengan 08.00 WIB besok paginya. Proses pengujian dilakukan dalam sepuluh siklus dimana satu siklus lamanya 24 jam. Pada pengujian ini, siklus yang berlangsung memiliki dua proses yaitu proses desorpsi dari mulai pagi hingga sore hari dan proses adsorpsi dari sore hingga kembali ke pagi hari. Siklus yang berlangsung tersebut cukup berperan terhadap performansi mesin pendingin yang dihasilkan karena dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Agar dapat terjadinya proses desorpsi maka dibutuhkan energi panas dari radiasi matahari sedangkan pada saat adsorpsi terjadi proses pendinginan secara

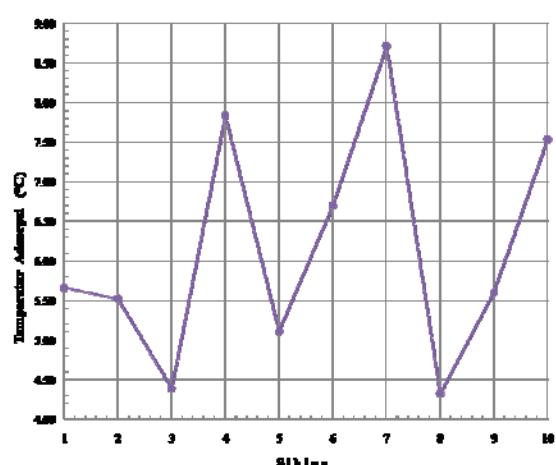
konveksi alamiah pada komponen kolektor. Pada pengujian ini juga dipasang *pressure gauge* untuk mengukur perubahan tekanan yang terjadi pada mesin pendingin. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa terjadi variasi tekanan mulai saat proses desorpsi hingga proses adsorpsi memiliki nilai diantara -0,898 bar sampai dengan -0,620 bar.



Gambar 3. Radiasi matahari saat pengujian

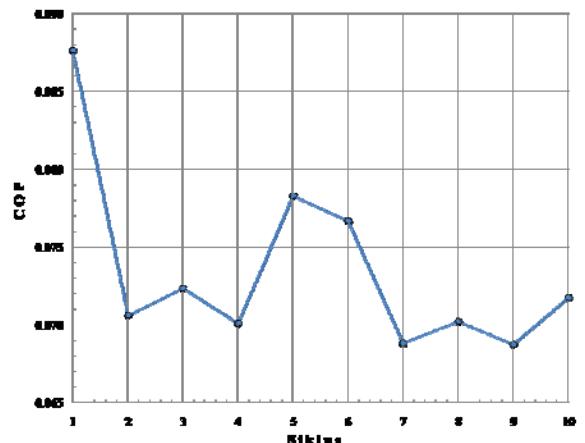


Gambar 4. Temperatur awal air saat desorpsi

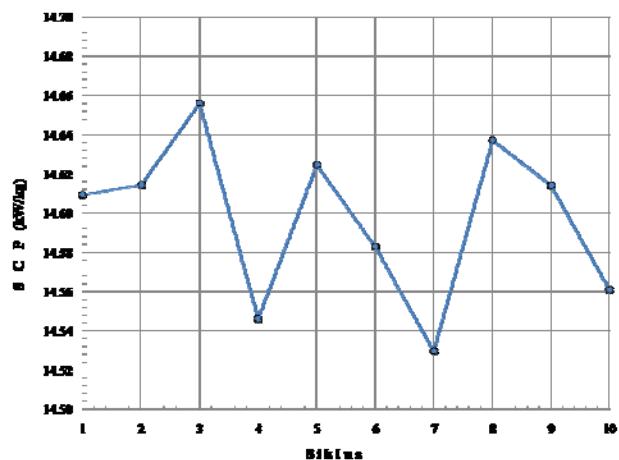


Gambar 5. Temperatur akhir air saat adsorpsi

Dari gambar 3 tampak bahwa besarnya intensitas radiasi matahari selama sepuluh siklus pengujian berfluktuasi dimana paling tinggi terjadi pada siklus ketiga sebesar $4,9273 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dan paling rendah terjadi pada siklus pertama ketiga yaitu $3,7358 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Pada gambar 4 dan gambar 5 tampak kondisi temperatur desorpsi dan adsorpsi air selama pengujian. Dari hasil pengujian selama sepuluh hari diperoleh temperatur air paling rendah pada saat proses adsorpsi sebesar $4,32^\circ\text{C}$ dari temperatur awal air $25,42^\circ\text{C}$. Besarnya temperatur akhir air selama proses adsorpsi untuk sepuluh siklus pengujian berkisar dari $4,32^\circ\text{C} - 8,71^\circ\text{C}$. Fluktuasi temperatur air pada saat proses desorpsi dan adsorpsi turut dipengaruhi oleh total intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor dan temperatur pada setiap komponen mesin pendingin.



Gambar 6. Nilai COP yang diperoleh



Gambar 7. Nilai SCP yang diperoleh

Gambar 6 dan 7 menunjukkan besarnya nilai COP (*coefficient of performance*) dan SCP (*specific cooling power*) yang diperoleh selama pengujian. Nilai COP maksimum diperoleh pada pengujian

siklus pertama sebesar 0,0876 dan nilai COP minimum diperoleh pada siklus kesembilan sebesar 0,0687. Harga SCP maksimum didapatkan 0,014656 kW/kg pada siklus ketiga dan nilai SCP minimum diperoleh pada siklus ketujuh sebesar 0,014530 kW/kg. Dari hasil pengujian selama sepuluh siklus diperoleh bahwa total intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor cukup bervariasi karena dipengaruhi oleh kondisi cuaca sehingga turut mempengaruhi besarnya nilai COP dan SCP yang diperoleh.

Tabel 2. Kondisi Cuaca Selama Pengujian

Tanggal	Siklus	Temperatur	Kelembaban	Lama	Intensitas
Uji		Lingkungan	Relatif Rata-rata	Penyinaran	Radiasi Total
Juni 2014		Rata-rata (°C)	(%)	(Jam)	(kWh/m ²)
6 - 7	Siklus 1	29.92	83.16	12.30	3.7358
7 - 8	Siklus 2	30.70	77.84	12.43	4.6803
8 - 9	Siklus 3	30.58	73.87	12.40	4.9273
9 - 10	Siklus 4	29.48	79.74	12.38	4.1061
10 - 11	Siklus 5	29.69	77.54	12.50	4.2929
11 - 12	Siklus 6	29.08	80.91	10.87	4.5079
12 - 13	Siklus 7	29.63	78.12	12.38	4.0353
13 - 14	Siklus 8	30.18	77.78	12.25	4.9084
14 - 15	Siklus 9	30.50	70.57	12.13	4.8044
15 - 16	Siklus 10	30.68	69.90	12.50	4.1414

Parameter yang mempengaruhi nilai COP adalah intensitas radiasi matahari dan temperatur akhir air sebagai media yang didinginkan pada saat proses adsorpsi. Sedangkan untuk harga SCP dipengaruhi oleh temperatur air yang diperoleh saat proses desorpsi dan adsorpsi serta jumlah massa adsorben yang digunakan.

Dari hasil analisa statistik diperoleh hubungan nilai COP dengan total intensitas radiasi matahari yang diterima kolektor memiliki korelasi negatif yang cukup signifikan yaitu sebesar -0,55. Sedangkan hubungan nilai SCP yang diperoleh dengan total intensitas radiasi matahari memiliki korelasi positif yang cukup signifikan sebesar 0,65. Secara perhitungan teoritis, neraca energi yang terjadi di evaporator ditampilkan pada tabel 3.

Dari tabel 3 tampak bahwa besarnya energi panas yang akan diserap oleh metanol untuk dapat menguap sebesar 1860 kJ. Jumlah panas ini lebih

besar dibandingkan dengan energi panas yang akan digunakan untuk mengubah air menjadi es sebesar 1710 kJ.

Tabel 3. Neraca energi di evaporator

No	Keterangan	Unit	Satuan
1	Volume metanol	2	liter
	Massa jenis metanol (26°C)	786.3	kg/m ³
	Massa metanol	1,573	kg
	Kalor laten penguapan metanol (26°C)	1183	kJ/kg
	Jumlah energi panas yang diserap metanol selama menguap	1860	kJ
2	Volume air	3,5	liter
	Massa jenis air (26°C)	996.8	kg/m ³
	Massa air	3,48	kg
	Kalor jenis air pada (26°C)	4,180	kJ/kg°C
	Kalor pembekuan air	334	kJ
	Jumlah energi panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi es	1710	kJ

Kesimpulan

Besarnya kinerja mesin pendingin adsorpsi dipengaruhi oleh jumlah radiasi matahari yang diterima oleh kolektor mesin pendingin. Selama pengujian, mesin pendingin memiliki nilai koefisien performansi (COP) maksimum 0,0876 dan nilai COP minimum diperoleh 0,0687. Sedangkan nilai maksimum SCP diperoleh sebesar 0,014656 kW/kg dan nilai minimum SCP diperoleh 0,014530 kW/kg. Dari hasil pengujian juga diperoleh bahwa temperatur air paling rendah yang dapat didinginkan sebesar 4,32°C dari temperatur awal air 25,42°C.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Proyek CASINDO atas bantuan peralatan ukur cuaca Data HOBO Station dan data akusisi agilent.

Referensi

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, *Outlook Energi Indonesia 2012*, BPPT Press, Jakarta, 2012
- [2] Buku Putih Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025, Kemenristek, Jakarta (2006).

- [3] M. Pons and J.J. Guilleminot, Design of an experimental solar-powered, solid-adsorption ice maker, *Transactions of the ASME, Journal of Solar Energy Engineering* 108 (1986).
- [4] M. Li, R.Z. Wang, Y.X. Xu, J.Y. Wu, and A.O. Dieng, Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker, *Renewable Energy* 27 (2002).
- [5] N.M. Khattab, A novel solar-powered adsorption refrigeration module, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004).
- [6] M. Li, C.J. Sun, R.Z. Wang, dan W.D. Cai, Development of no valve solar ice maker, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004).
- [7] M.A. Alghoul, M.Y. Sulaiman, B.Z. Azmi, M.Abd. Wahab, Advances on multi-purpose solar adsorption systems for domestic refrigeration and water heating, *Elsevier* (2006).
- [8] N. Spahis, A. Addoun and H. Mahmoudi, Study on solar adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon prepared from olive stones, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 10 No.3 (2007).
- [9] Y. Fan, Review of solar adsorption technologies - Development and Applications, *Elsevier* (2007)
- [10] E.E. Anyanwu, Review of solid adsorption solar refrigerator I: an overview of the refrigeration cycle, *Elsevier* (2003).
- [11] Watheq Khalil Said Hussein, "Solar Energy Refrigeration by Liquid-Solid Adsorption Technique" Thesis, (2008)
- [12] L.W. Wang, R.Z. Wang, R.G. Oliveira, A review on adsorption working pairs for refrigeration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, Elsevier (2009).
- [13] Muhammad Umair, Atsushi Akisawa and Yuki Ueda, "Performance Evaluation of a Solar Adsorption Refrigeration System with a Wing Type Compound Parabolic Concentrator", *Energies* 2014, 7, 1448-1466, (2014).
- [14] Tulus B. Sitorus, Farel H.N, Himsar Ambarita, Karakteristik Mesin Pendingin Energi Surya dengan Pasangan Karbon Aktif dan Metanol, *Jurnal Hasil Penelitian Industri* Vol 26 No. 1 April 2013, No. Akreditasi 427/AU/P2MI-LIPI/04/2012, ISSN 2089-5380.
- [15] Tulus B. Sitorus, Farel H.N, Himsar Ambarita, Kajian Eksperimental Pengaruh Cuaca Terhadap Koefisien Performansi Mesin Pendingin Siklus Adsorpsi Tenaga Matahari, Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Universitas Kristen Petra Surabaya, 20 Juni 2013.

Daftar Notasi

- A = luas penampang kolektor (m^2)
- COP = *coefficient of performance*
- c_{p_w} = kalor jenis air (kJ/kg $^{\circ}$ C)
- G_i = radiasi hasil pengukuran (W/m 2)
- L_w = kalor laten penguapan air (kJ/kg)
- m_a = massa adsorben di dalam kolektor (kg)
- m_w = massa air (kg)
- Q_s = kalor sensibel air (kJ)
- Q_{solar} = kalor yang diterima kolektor dari radiasi matahari (kJ)
- SCP = *specific cooling power* (kW/kg)
- T_{wf} = temperatur akhir air ($^{\circ}$ C)
- T_{wi} = temperatur awal air ($^{\circ}$ C)
- t_c = waktu siklus (detik)
- W_L = daya pendinginan (kW)
- ΔT_w = perbedaan temperatur air saat proses desorpsi dan adsorpsi ($^{\circ}$ C)