

OPTIMASI UNJUK KERJA PADA SISTEM PENDINGINAN ADSORPSI DENGAN SIKLUS PEMANASAN-ULANG KOMBINASI

OPTIMIZATION OF THE ADSORPTION COOLING SYSTEM'S PERFORMANCE USING A COMBINED REHEAT CYCLE

*I Gusti Agung Bagus Wirajati**, Putu Wijaya Sunu dan Ni Kadek Muliati
Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali

Ida Ayu Gede Bintang Madrini
Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana

Submitted:20-03-2022; Revised:19-10-2022; Accepted:23-10-2022

ABSTRACT

The adsorption refrigeration system is a cooling system that offers several benefits, including being environmentally friendly due to the very small amount of global warming effect given, the lack of potential for ozone depletion, the low energy consumption of its operation, the low heat source used in its operation and good for reducing gas emissions on earth. This paper describes a combined reheating adsorption refrigeration system with three heat exchangers, as well as operating modes. The operation of the adsorption refrigeration system with combined reheating is schematically described with operational modes and diagrams. This adsorption cooling system is made up of three heat exchangers (H), one evaporator, and one condenser. The combination cycle is intended for heat exchanger systems that operate in a reheat cycle (H1 and H2) and a non-reheating cycle (H3). This paper also discusses system cycle time optimization. Research to get the optimum value of cycle time in this system is still rarely done and therefore optimization of cycle time is carried out on the system to get the best performance. The PSO (particle swarm optimization) program is paired with the MATLAB program to simulate the performance of the system under discussion while also enhancing its performance. The goal of this work is to use simulation to determine the optimal system performance versus the overall cycle time, which includes adsorption/desorption time, pre-cooling and pre-heating time as well as mass recovery time. Getting the best value for the entire cycle time is made possible by fusing the simulation of the system's process performance with performance optimization. As a results, the greatest increase in the optimization results' performance value occurs at a heat source temperature of 55°C with a longer time to achieve optimal performance.

Keywords: adsorption system; cycle combination; optimization; COP; cooling capacity.

ABSTRAK

Sistem refrigerasi adsorpsi merupakan sistem pendinginan yang memberikan beberapa keuntungan diantaranya adalah ramah lingkungan karena efek pemanasan global yang diberikan sangatlah kecil, tidak berpotensi didalam penipisan ozonnya, sumber panas yang digunakan dalam operasinya merupakan sumber panas yang rendah dan konsumsi energinya yang rendah sehingga baik untuk mengurangi emisi gas di bumi. Pada tulisan ini diperkenalkan sebuah sistem pendinginan adsorpsi pemanasan ulang kombinasi dengan tiga penukar kalor

*Corresponding author: igabwirajati@pnb.ac.id

Copyright ©2022 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Jurnal Teknosains is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

yang ditampilkan dengan menampilkan skema dari sistemnya. Prinsip kerja dari sistem yang ditawarkan juga dijelaskan pada tulisan ini. Sistem pendinginan adsorpsi ini terdiri dari tiga alat penukar kalor (H) adsorber/desorber, satu evaporator dan satu kondensor. Kombinasi siklus dimaksudkan kepada sistem penukar kalornya yang bekerja dalam siklus pemanasan ulang (H1 dan H2) dan siklus tanpa pemanasan ulang (H3). Penelitian untuk mendapatkan nilai optimum dari waktu siklus pada sistem ini masih jarang dilakukan dan oleh karenanya dilakukan optimasi waktu siklus pada sistem untuk mendapatkan unjuk kerja terbaiknya. Metode simulasi unjuk kerja proses dari sistem yang dibahas ini dikerjakan dengan menggunakan program MATLAB, yang selanjutnya dipadukan dengan mengoptimasi kinerjanya melalui program PSO (particle swarm optimization). Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai optimum unjuk kerja dari sistem terhadap waktu siklus totalnya dengan menggunakan simulasi, yang meliputi waktu adsorpsi/desorpsi, waktu pra-dingin dan pra-panas serta waktu pemulihan masa. Dengan memadukan simulasi unjuk kerja proses dari sistem dengan optimasi terhadap kinerjanya memberikan manfaat yang nyata untuk mendapatkan nilai optimum terhadap keseluruhan waktu siklusnya. Peningkatan nilai unjuk kerja hasil optimasi yang terbesar terjadi pada suhu sumber panas 55°C dengan waktu siklus keseluruhan yang lebih lama untuk mendapatkan kinerja optimal.

Kata Kunci: sistem adsorpsi; siklus kombinasi; optimasi; COP; kapasitas pendingin.

PENGANTAR

Selama beberapa dekade, sudah ada banyak usaha yang dilakukan dalam upaya untuk menggunakan dan mengimplementasikan sistem adsorpsi baik pada siklus pendinginan maupun pada sistem pompa panas, dimana usaha yang sungguh-sungguh tersebut baru dilakukan secara serempak akibat adanya pembatasan internasional pada pembuatan dan pemanfaatan CFC dan HCFC. Dalam hal ini, sistem pendinginan adsorpsi yang berbasis penggunaan air dan silika gel sebagai pasangan adsorben dan refrigerannya merupakan sistem pendinginan yang memiliki keunggulan tersendiri dalam kemampuannya untuk digerakkan oleh panas pada suhu mendekati lingkungan sehingga panas buangan di bawah 100 °C dapat dipergunakan kembali.

Dalam tulisan ini, disain sistem pendinginan adsorpsi dengan siklus pemanasan ulang kombinasi, diuraikan bersama dengan prinsip kerjanya dan optimasi unjuk kerjanya.

Sistem pendinginan adsorpsi adalah salah satu sistem yang menjanjikan karena sangat ramah lingkungan dan dapat menggunakan suhu yang rendah, sebagai sumber panas penggerak dalam siklus kerjanya (Pinheiro dkk., 2020; Riaz dkk., 2022). Dengan menggunakan air dan silika gel sebagai pasangan adsorben-refrigeran dalam sistem menunjukkan bahwa sistem pendingin adsorpsi ini cocok untuk mengurangi emisi gas dan konsumsi energi yang rendah dapat dicapai (Kashiwagi dkk., 2002). Beberapa penelitian tentang unjuk kerja pendinginan adsorpsi telah dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai pasangan adsorben/adsorbat. Berikut adalah contohnya: zeolit/air (Ally & Sharma, 2018; Karagiorgas & Meunier, 1987; Tchernev, D.I., Emerson, 1988), karbon aktif atau amonia (Critoph dkk., 1986) dan silika gel/air (Akahira dkk., 2004; Boelman dkk., 1995; Chua dkk., 1999). Pemanfaatan sumber panas suhu rendah telah diusulkan seperti siklus pemulihan panas dan masa (Saha dkk., 2013), pendinginan sistem bertingkat (Chua dkk., 2001), penyelidikan secara eksperimen (Alam dkk., 2007; Wirajati dkk., 2015).

Untuk mencapai nilai unjuk kerja yang lebih baik, sebagian besar sistem pendinginan adsorpsi yang lebih maju telah dilakukan penelitian lanjutan baik yang dilakukan secara penelitian laboratorium maupun dalam bentuk pemodelan simulasi (Rogala, 2017; Saha et al., 2006; 2003). Penelitian tentang unjuk kerja juga sudah dilaksanakan pada sistem pendinginan adsorpsi pemanasan ulang dua tingkat dengan menggunakan empat penukar kalor yang dapat memanfaatkan sumber panas 50-90 C dalam operasionalnya (Alam dkk., 2003; Bahrehmand & Bahrami, 2021; Tong dkk., 2000).

Pengurangan penggunaan alat penukar kalor pada sistem pendinginan adsorpsi juga sudah ditinjau secara pemodelan dan juga sudah dioptimasi dan mendapatkan hasil yang sangat menjanjikan dalam upaya untuk meminimalkan ukuran mesin-mesin pendinginan adsorpsi yang akan dirancang

dan dapat dilakukan untuk sumber panas dengan suhu yang relatif rendah di bawah 60 C (Khan dkk., 2007; Mizanur dkk., 2013).

Sampai saat inipun penelitian dan pengembangan sistem pendinginan adsorpsi masih terus dilaksanakan baik secara eksperimen maupun dalam bentuk pemodelan yang dilakukan dengan berbagai program simulasinya. Penelitian dan pengembangan yang dilakukan tersebut tersebut semuanya untuk mendapatkan dan untuk memenuhi kemampuan unjuk kerja yang semakin meningkat. Dalam kaitannya dengan penelitian yang dilakukan secara pemodelan simulasi, peningkatan unjuk kerja dengan pemanfaatan sumber panas awal yang rendah yang dipadukan dengan pengurangan penggunaan alat penukar kalor juga masih terus dilakukan (Wirajati dkk., 2014).

Dari beberapa penelitian yang sudah dilaksanakan, sistem pendinginan adsorpsi dengan siklus pemanasan-ulang kombinasi masih minim dan bahkan penelitian tentang optimasi unjuk kerjanya juga sedikit. Hal inilah yang mendasari maka pada tulisan ini tujuan yang ingin dicapai adalah untuk mendapatkan nilai unjuk kerja dari waktu siklus total pada sistem pendinginan adsorpsi pemanasan ulang kombinasi dengan tiga penukar kalor yang dikerjakan dengan mengoptimasi waktu siklus keseluruhannya.

METODE

Metode yang dipergunakan untuk mendapatkan tujuan yang ingin dicapai pada tulisan ini adalah dengan simulasi. Simulasi yang dikerjakan terdiri dari dua yakni simulasi mengenai prinsip kerjanya yang dibangun melalui program MATLAB dan simulasi untuk mendapatkan nilai optimasi dari kinerjanya yang dilakukan dengan program PSO. Membangun simulasi prinsip kerjanya selalu mengacu pada gambar 1, tabel 1, tabel 2 dan rumusan-rumusan yang diberikan. Sedangkan untuk mendapatkan nilai optimum dari kinerja sistemnya maka program simulasi dari MATLAB yang sudah dikerjakan akan dikoding ke PSO dengan memberikan perintah bahasa program khusus untuk menjalankan

simulasi yang ada agar optimasi dapat dilakukan.

Program simulasi yang dijalankan untuk mengetahui unjuk kerja dari siklus pada penelitian ini adalah dikembangkan berdasarkan perangkat lunak Matlab untuk menyelesaikan semua persamaan rumus yang diberikan. Pada saat awal proses penyelesaian atau solusi, nilai awal diasumsikan dan kemudian pada akhirnya akan disesuaikan oleh suatu proses pengulangan yang diberikan. Setelah kriteria capaian yang diharapkan sudah tercapai, maka proses kembali akan berlanjut untuk langkah waktu berikutnya. Semua parameter input seperti sifat-sifat fisik dari adsorben-refrigeran, laju aliran cairan perpindahan panas dan spesifikasi penukar panas, pada awalnya diberikan agar operasi sistem pada siklusnya dapat direalisasikan.

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah program optimasi lanjutan yang diterapkan untuk mengoptimalkan waktu siklus berdasarkan nilai maksimum unjuk kerja dan kapasitas pendinginan yang dipilih sebagai fungsi objektif serta komponen waktu siklus (yaitu, waktu adsorpsi dan desorpsi, waktu pra-pendinginan dan pra-pemanasan dan waktu pemulihan masa atau mass recovery) dipilih sebagai variabel. Dalam PSO, sebuah partikel memegang nilai-nilai variabel dan memperbarui nilai-nilai ke arah solusi yang optimal. Setelah sejumlah perhitungan diperbaharui maka semua partikel-partikel yang akan memiliki nilai yang sama dan nilai fungsi tujuan akan dimaksimalkan. Dalam hal ini, jumlah partikel dan jumlah iterasi atau pengulangan dari nilai masing-masing yakni 20 dan 500. Pengamatan semua partikel akan mencapai posisi terbaiknya sebelum pengulangan 500 dan ini yang akan menunjukkan nilai optimum yang dicari.

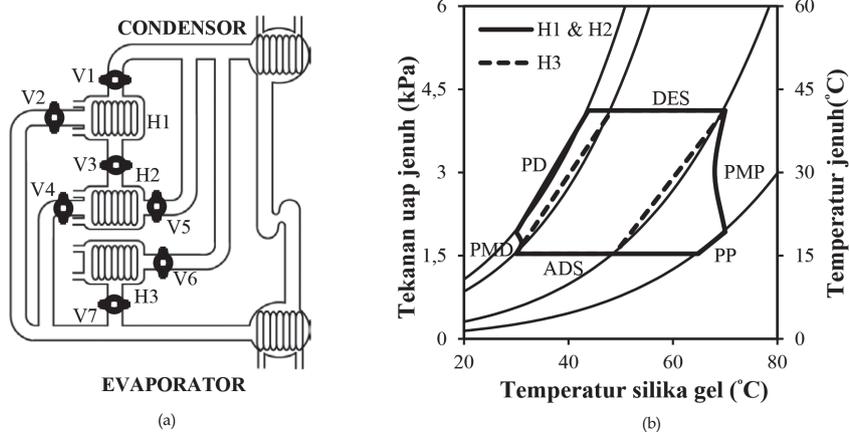
Prinsip kerja sistem pendinginan adsorpsi dengan pemanasan kombinasi

Skema sistem pendinginan adsorpsi dengan pemanasan ulang kombinasi, diagram Temperatur-Tekanan-Konsentrasi (PTK) dan tahap proses operasionalnya ditampilkan pada

Gambar 1 dan Tabel 1. Ada tiga alat penukar kalor, yang untuk selanjutnya akan disebut sebagai H, yakni H1, H2 dan H3. Untuk bisa bekerja dalam satu siklus lengkapnya, H1 dan H2 akan melalui 6 tahapan proses, sementara H3 hanya melalui empat tahapan proses yang mengacu pada tahapan proses operasionalnya. Hal inilah yang disebut sebagai proses kombinasi (perpaduan proses) dan semua H bekerja secara terus-menerus dan bersamaan dalam sepuluh tahapan proses mengacu pada tabel 1.

Pada awal tahap proses operasionalnya (tahap A-C), katup (V1, V2 dan V6) dalam posisi terbuka. Pada saat ini H1 dan H3 terhubung dengan kondensator dan pada saat ini tahapan proses desorpsi dimulai, sedangkan H2 akan tersambung dengan evaporator dan tahapan proses adsorpsi juga dimulai. Tahapan proses adsorpsi berlangsung pada tekanan evaporator sedangkan tahapan proses

desorpsi berlangsung pada tekanan kondensator, seperti terlihat pada Gambar1 (b) diagram PTX. Selama dalam tahapan proses desorpsi, H1 dan H3 dipanaskan dengan air panas (Q_{des}) yang akan menuju kepada temperatur kondensator (T_{des}) yang telah disediakan oleh sumber panas penggerakannya. Uap refrigeran yang dihasilkan akan didinginkan sampai pada suhu kondensator (T_c) oleh air pendingin sehingga panasnya (Q_c) bisa hilang secara perlahan. Selama tahapan dari proses adsorpsi, refrigeran yang ada didalam evaporator akan diuapkan pada suhu penguapan (T_e) dan akan menangkap panas (Q_e) dari air dingin yang ada. Adsorber (H2) akan menyerap uap dari hasil evaporasi dan panas adsorpsi (Q_{ads}) akan dihilangkan oleh air pendingin yang ada. Pada saat konsentrasi larutan pendingin yang ada diantara desorber (H1) dan adsorber (H2) mendekati keadaan kesetimbangan, maka proses akan berlanjut ke tahapan proses D.



Gambar 1. Skematika Sistem Pendingin Adsorpsi Dengan Pemanasan Ulang Kombinasi (a) dan Diagram Temperatur-Tekanan-Konsentrasi (PTK) (b) Sumber (Penulis, 2022)

Table 1. Tahapan Proses Pengoperasionalan Sistem

H	Tahapan Proses									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	DES			PMP	PD	ADS			PMD	PP
2	ADS			PMD	PP	DES			PMH	PD
3	DES			PD		ADS			PP	

Keterangan: ADS=Adsorpsi; DES=Desorpsi; PD=PrA-dingin; PP=PrA-panas; PMD= pemulihan masa dingin; PMP=pemulihan masa panas Sumber (Penulis, 2022)

Pada saat tahapan proses terjadi di D, semua H tidak akan terhubung baik ke kondensator atau evaporator. H1 akan berada pada posisi diakhir tahapan proses dari desorpsi dan H2 berada pada posisi diakhir tahapan proses dari adsorpsi. Dalam hal ini H1 akan terhubung dengan H2 dengan membuka katup dari V3, dimana air dingin yang ada di H2 dan air panas yang ada di H1 tetap disirkulasikan. Tahapan proses ini disebut dengan tahapan proses pemulihan masa (*mass recovery*) dengan pendinginan (PMD) yang terjadi pada H2 dan tahapan proses pemulihan masa dengan pemanasan (PMP) yang terjadi pada H1. Pada tahapan proses ini juga, H3 akan didinginkan dengan air dingin yang selanjutnya disebut sebagai tahapan proses pra-dingin (PD). Pada saat nilai tekanan yang terjadi diantara H1 dan H2 nilainya mendekati sama, maka tahapan proses akan dilanjutkan ke tahapan berikutnya yakni tahapan pada proses E. Didalam tahapan proses E, H1 dan H3 didinginkan dengan air dingin dan akan mengalami tahapan proses pra-dingin (PD), dan H2 dipanaskan dengan air panas, dimana tahapan prosesnya disebut sebagai tahapan proses pra-panas (PP). Pada saat tekanan H1 dan H3 mendekati tekanan evaporator dan pada saat tekanan H2 mendekati tekanan kondensator, maka katup V2, V5 dan V7 akan terbuka agar refrigeran dapat mengalir. Pada saat ini, H1 dan H3 akan terhubung evaporator dan H2 akan tersambung dengan kondensator. Dalam hal ini, tahapan proses E adalah tahapan proses terakhir dari setengah tahapan dari satu siklus atau proses lengkapnya. Sedangkan untuk dapat menyelesaikan satu siklus lengkapnya, maka sistem akan menyelesaikan tahapan proses selanjutnya yakni tahapan proses yang sama dengan setengah tahapan proses sebelumnya dimana H1 dan H3 akan melakukan tahapan proses adsorpsi sedangkan H2 pada tahapan proses desorpsi.

Perpindahan Panas pada alat penukar kalor Adsorber/Desorber (H), Evaporator dan Kondensator

Perpindahan panas yang terjadi pada H, evaporator dan kondensator dapat dilihat pada rumus sebagai berikut:

$$T_o = T + (T_i - T) \exp\left(-\frac{U_{bed} \cdot A_{bed}}{\dot{m}_w \cdot C_w}\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$T_{chill,o} = T_{eva} + (T_{chill,i} - T_{eva}) \exp\left(-\frac{U_{eva} \cdot A_{eva}}{\dot{m}_{ch} \cdot C_{ch}}\right) \dots\dots(2)$$

$$T_{con,o} = T_{con} + (T_{cw,i} - T_{con}) \exp\left(-\frac{U_{con} \cdot A_{con}}{\dot{m}_{cw} \cdot C_w}\right) \dots\dots(3)$$

Dalam hal ini, T menunjukkan suhu. Suhu dan konsentrasi cairan baik di H, evaporator maupun kondensator diasumsikan seragam. Panas spesifik dari refrigerant (air) pada fase cair karena sistem bekerja dalam kisaran konsentrasi rendah. Suhu perpindahan panas cairan fluida (air), T_i dan T_o , menunjukkan air dingin dan air panas disaat proses adsorpsi dan desorpsi. U dan A pada rumus yang tertera diatas menyatakan parameter perpindahan panas yaitu keseluruhan koefisien perpindahan panas dan area perpindahan panasnya.

Kesetimbangan Energi pada Adsorber/Desorber (H), Evaporator dan Kondensator

Kesetimbangan energi pada H, evaporator dan kondensator dapat dilihat pada rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & (W_s \cdot C_s + W_s \cdot C_w \cdot q + W_H \cdot C_H) \frac{dT}{dt} \\ & = W_s \cdot Q_s \frac{dq}{dt} - W_s \cdot C_v \cdot \delta [\gamma (T - T_{eva}) + \\ & \quad (1 - \gamma) (T - T_{wv})] \frac{dq}{dt} \\ & \quad + \dot{m}_w \cdot C_w \cdot \epsilon_H (T_i - T) \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (W_{eva,w} \cdot C_w + W_{eva,H} \cdot C_{eva,H}) \frac{dT_e}{dt} \\ & = \dot{m}_{chill} \cdot C_{chill} \cdot \epsilon_{eva} (T_{chill,i} - T_{chill,o}) \\ & - W_s \left(\frac{dq_{ads}}{dt} + \frac{dq_{des}}{dt} \right) (L + C_v (T_{con} - T_{eva})) \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (W_{con,w} \cdot C_w + W_{con,H} \cdot C_{con,H}) \frac{dT_c}{dt} \\ & = \dot{m}_{cw} \cdot C_w \cdot \epsilon_{con} (T_{cw,i} - T_{cw,o}) \\ & - W_s \left(\frac{dq_{des}}{dt} + \frac{dq_{ads}}{dt} \right) (L + C_v (T_{des} - T_{con})) \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

Pada sisi kiri dari persamaan (5 dan 6) mewakili panas sensibel yang dibutuhkan oleh refrigeran cair dan logam tabung penukar panas dalam evaporator dan kondensor. Istilah yang pertama di sisi kanan pada persamaan (5) adalah mewakili jumlah total panas dari air dingin dan pada persamaan (6) memberikan jumlah panas yang dilepaskan ke air pendingin. Istilah yang kedua pada persamaan (5) adalah menjelaskan menjelaskan panas laten penguapan (L) untuk jumlah refrigeran yang diadsorpsi (dq_{ads} / dt) dan panas sensibel yang diperlukan untuk mendinginkan kondensat yang masuk dari suhu kondensasi T_{con} ke suhu penguapan T_{eva} , sedangkan istilah kedua pada persamaan (6) menjelaskan panas laten penguapan (L) untuk jumlah zat pendingin yang diserap (dq_{des} / dt) dan jumlah panas yang dibawa oleh cairan kondensat ketika itu meninggalkan kondensor ke evaporator

Unjuk Kerja Sistem

Unjuk kerja (COP) dan kapasitas pendinginan (CC) adalah karakteristik kinerja sistim yang utama dan dapat diukur dengan menggunakan rumusan sebagai berikut:

$$COP = \dot{m}_{ch} C_w \int_0^{t_{cycle}} (T_{ch,i} - T_{ch,o}) dt / \dot{m}_{hw} \times C_w \int_0^{t_{cycle}} (T_{hw,i} - T_{hw,o}) dt \dots \dots \dots (13)$$

$$CC = \dot{m}_{ch} C_w \int_0^{t_{cycle}} (T_{ch,i} - T_{ch,o}) dt / t_{cycle} \dots \dots \dots (14)$$

Nilai-nilai parameter sifat fisik yang digunakan dalam perhitungan akan ditunjukkan pada Tabel 2 dan kondisi operasi standar yang diadopsi dalam simulasi menagcu pada Tabel 3.

Table 2
 Nilai-nilai parameter perhitungan dalam simulasi

Simbol	Nilai	Satuan
C_s	924	J/kg K
C_v	1,890	J/kg K
C_w	4,180	J/kg K
D_o	0,000254	m ² /s
E_a	2,330,000	J/kg
L_w	2,500,000	J/kg
Q_s	2,860,000	J/kg
UA_{ads}	2,000	W/m ² K
UA_{des}	2,230	W/m ² K
UA_{eva}	2,360	W/m ² K
UA_{con}	4,060	W/m ² K
W_s	16	kg
$W_{con,w}$	5	kg
$W_{eva,w}$	25	kg

Sumber (Penulis, 2022)

Table 3.
 Kondisi standard operasional untuk sistem dalam simulasi

	Temperature (C)	Flow Rate (kg/s)
Air panas	55-70	1
Air dingin	30	1(ads) + 0.8(des)
Air chilled	14	0.8
Waktu siklus (ADS/DES+PMD/PMP+PP/PC)	(420 + 200 + 30)s	

Keterangan:
 ADS/DES = adsorption/desorption
 PP/PD = pra-panas/pra-dingin
 Sumber (Penulis, 2022)
 PMD/PMP = pemulihan masa dingin/ pemulihan masa panas

HASIL DAN PEMBAHASAN
Karakteristik jumlah kadar (q) air pada alat penukar kalor (H)

Gambar 2 akan memperlihatkan variasi kadar air dalam alat penukar kalor H. Suhu sumber panasnya yang digunakan adalah 55 C

dan suhu outlet air yang diterapkan tetap pada temperatur 9 C. Kadar air di dalam H terlihat menurun selama proses desorpsi karena uap terkondensasi ke dalam kondensor (yaitu pada tahapan proses A-B-C untuk H1 dan H3 dan pada tahapan proses F-G-H untuk H2) dan

tampak meningkat selama proses adsorpsi karena H menyerap uap dari evaporator (yaitu pada tahapan proses A-B-C untuk H2 dan pada tahapan proses F-G-H untuk H1 dan H3).

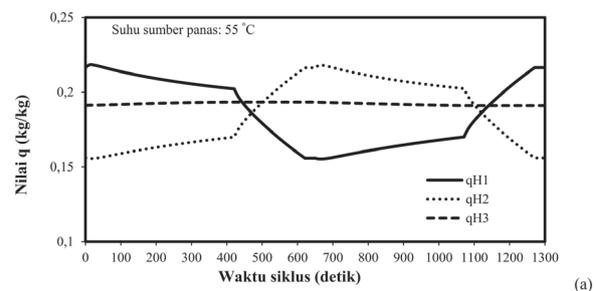
Selama proses pra-pemanasan dan pra-pendinginan, kandungan air di semua H adalah tetap atau konstan karena pada tahapan proses ini semua katup yang ada pada sistem dalam kondisi tertutup sepenuhnya (yaitu pada tahapan proses E, pada tahapan proses J untuk H1 dan H3 dan pada tahapan proses B dan tahapan proses G untuk H2 dan H4). Pada saat proses pemulihan masa dengan pemanasan, kadar air yang ada pada H1 mengalami pengurangan (yakni pada tahapan proses D) karena uap berpindah atau mengalir ke H2, sehingga kadar air dalam H2 mengalami penningkatan (yakni pada tahapan proses D). Sedangkan disaat proses pemulihan masa dengan pendinginan, kadar air dalam H1 mengalami peningkatan (yakni pada tahapan proses I) karena menerima uap dari H2 sehingga menyebabkan kadar air dalam H2 mengalami penurunan (yakni pada tahapan proses I). Seperti yang dapat dilihat dari Gambar 3 (a), kadar air H3 tampaknya berubah sedikit karena suhu sumber panas yang digunakan adalah 55 C dimana suhu ini terlalu rendah untuk mengembunkan uap dalam H, jika dibandingkan dengan suhu sumber panas 70 C pada Gambar 2 (b).

Pengaruh Waktu Adsorpsi / Desorpsi terhadap Unjuk Kerja dan Kapasitas Pendinginan

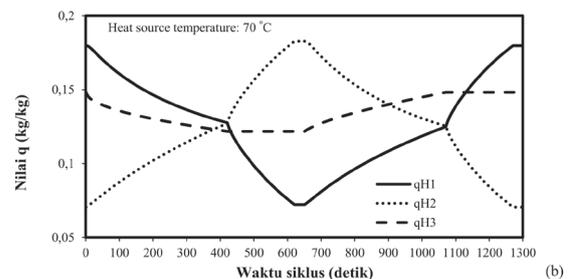
Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi unjuk kerja dan kapasitas pendinginan dengan waktu adsorpsi / desorpsi. Suhu sumber panas yang digunakan adalah 60 C dengan waktu pemulihan masa 100 detik dan waktu pra-pemanasan/pra-pendinginan 30 detik dipilih untuk dapat mengetahui efek dari waktu adsorpsi / desorpsi antara 100-800 detik terhadap unjuk kerjanya. Nilai kapasitas pendinginan terbaik yang dapat dicapai untuk waktu adsorpsi / desorpsi adalah berkisar diantara 300 detik dan 350 detik.

Seperti yang terlihat juga pada gambar, ketika waktu adsorpsi / desorpsi lebih pendek

dari 200 detik, hal ini menunjukkan tidak adanya cukup waktu untuk melakukan proses adsorpsi atau desorpsi secara efektif, sehingga kapasitas pendinginan mengalami penurunan secara tiba-tiba. Namun terjadi hal yang sebaliknya, jika waktu adsorpsi / desorpsi lebih lama dari 300 detik, dimana kapasitas pendinginan mengalami penurunan secara teratur karena kurang kuatnya proses adsorpsi terhadap kesetimbangannya atau pada saat mendekati kondisi kesetimbangannya. COP yang ditampilkan justru mengalami peningkatan secara konsisten dengan waktu adsorpsi / desorpsi yang lebih lama. Hal ini disebabkan karena konsumsi sumber panas yang diterapkan lebih rendah dengan lamanya waktu dari adsorpsi / desorpsi yang telah diberikan.



(a)



(b)

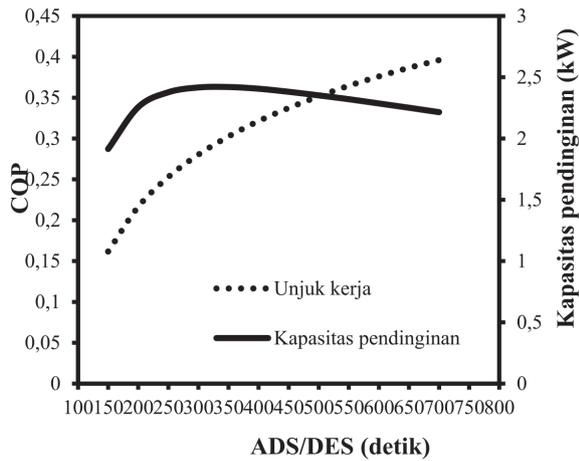
Gambar 2.

Variasi kadar air dalam adsorber / desorber untuk suhu sumber panas (a) 55 C dan (b) 70 C Sumber (Penulis, 2022)

Pengaruh Waktu Pemulihan Masa pada COP dan Kapasitas Pendinginan

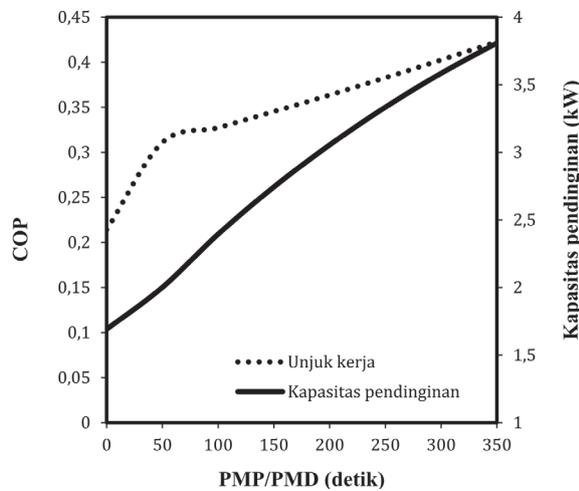
Proses pemulihan masa dapat secara efektif meningkatkan kinerja sistim adsorpsi yang menggunakan suhu sumber panas rendah. Proses ini tampak menyerupai seperti

pada proses adsorpsi atau desorpsi yang kedua pada H (adsorber / desorber).



Gambar 3.

Pengaruh Waktu Adsorpsi / Desorpsi terhadap Unjuk kerja dan kapasitas pendinginan Sumber (Penulis, 2022)



Gambar 5.

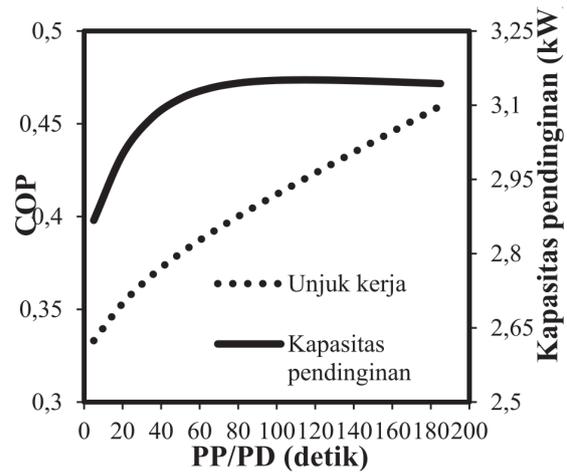
Pengaruh Waktu Pemulihan Masa Pada COP Dan Kapasitas Pendinginan. Sumber (Penulis, 2022)

Pengaruh Waktu Pra-pemanasan dan Pra-pendinginan terhadap COP dan Kapasitas Pendinginan

Proses pra-pemanasan dan pra-pendinginan pada sistem selalu diperlukan dalam siklus adsorpsi. Proses ini segera terhubung dari H dingin yang jatuh ke kondensor dan dari H panas ke evaporator.

Gambar 4 menunjukkan bagaimana waktu pra-pemanasan dan pra-pendinginan dapat memberikan pengaruh terhadap COP dan kapasitas pendinginannya.

Dapat dilihat bahwa, kapasitas pendinginan mengalami peningkatan secara signifikan dengan waktu pra-pemanasan dan pra-pendinginan sehingga mencapai nilai puncak pada 60 detik dan selanjutnya nilainya bervariasi setelah itu. Sedangkan nilai COP selalu mengalami peningkatan secara berurutan. Jadi dalam hal ini, waktu pra-pemanasan dan pra-pendinginan pada 60 detik menunjukkan nilai optimal untuk kapasitas pendinginannya, namun menjadi lebih lama untuk COP dengan suhu sumber panas 60 C.

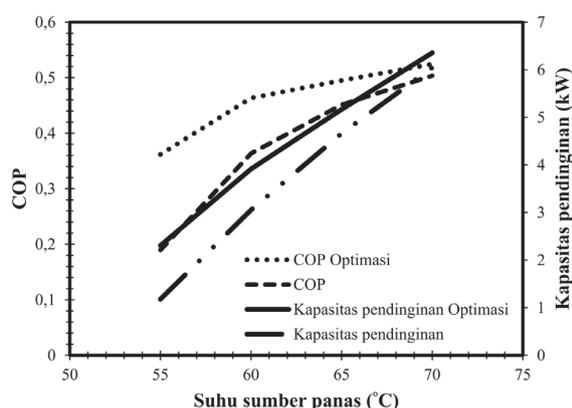


Gambar 4.

Pengaruh Waktu Pra-pemanasan dan Pra-pendinginan terhadap COP dan kapasitas pendinginan. Sumber (Penulis, 2022)

Gambar 5 menunjukkan efek dari waktu pemulihan masa pada unjuk kerja dan kapasitas pendinginan. Suhu sumber panas 60 C, waktu adsorpsi / desorpsi 420 detik dan waktu pra-pemanasan / pra-pendinginan 30 diterapkan untuk bisa mengetahui tidak hanya efek waktu pemulihan masa 50-350 detik, tetapi juga untuk bisa membandingkannya dengan yang tanpa waktu pemulihan masa (waktu pemulihan massal 0 detik).

Dalam hal ini terlihat bahwa disaat sistim tanpa adanya pemulihan masa, sistim bekerja sangat tidak efisien. Unjuk kerja dan kapasitas pendinginan tanpa proses pemulihan massa, nilainya masing-masing adalah 50% dan 44% lebih rendah nilainya dibandingkan dengan diterapkannya waktu pemulihan masa 350 detik. Dari sudut pandang ini, pemulihan masa merupakan hal yang sangat penting untuk diterapkan pada sistim ini, terutama jika ingin mengoperasikan sistim untuk suhu sumber panas yang rendah.



Gambar 6.

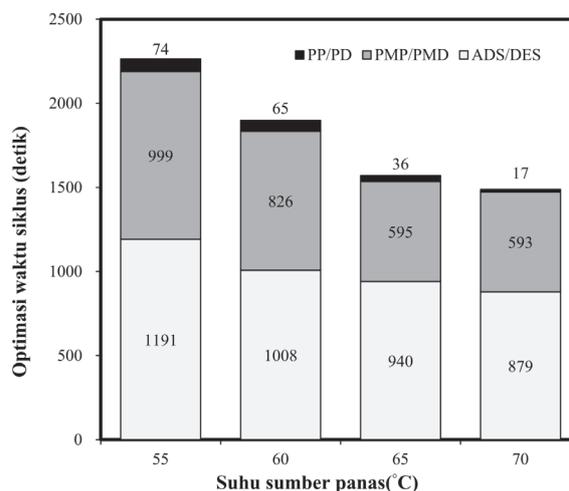
Nilai Unjuk Kerja Sebelum Dan Sesudah Optimasi
Sumber (Penulis, 2022)

Optimasi Waktu Siklus

Berdasarkan pada pengaruh-pengaruh dari waktu ads/des, pp/ph dan pmd/pmk terhadap unjuk kerja dari sistim ini, maka akan dimasukkan didalam menentukan optimasi waktu siklus keseluruhan. Optimasi waktu siklus keseluruhan terdiri dari waktu adsorpsi / desorpsi, waktu pemulihan masa dan waktu pra-pemanasan / pra-pendinginan.

Gambar 6 menunjukkan dengan jelas adanya peningkatan nilai unjuk kerja dari hasil optimasi terhadap waktu siklus dari sistem ini dengan pembanding yang diambil adalah nilai unjuk kerja dari waktu siklus sebelum dioptimasi. Peningkatan nilai unjuk kerja hasil optimasi yang terbesar terjadi pada suhu sumber panas 55 C dengan kecenderungan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan dari nilai sumber panasnya.

Distribusi nilai dari masing-masing waktu siklus hasil optimasi pada sistem pendinginan adsorpsi pemanasan-ulang kombinasi dengan tiga penukar kalor disajikan pada Gambar 7. Suhu sumber panas dari 55 hingga 70 C dipilih untuk menunjukkan karakteristik perubahannya. Untuk suhu sumber panas rendah (55 C) diperlukan waktu siklus yang lebih lama untuk mendapatkan kinerja optimal. Kecenderungan sebaliknya terjadi untuk suhu sumber panas tinggi (70 C).



Gambar 7.

Distribusi Waktu Siklus Keseluruhan Hasil Optimasi
Sumber (Penulis, 2022)

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa unjuk kerja sistem pendinginan adsorpsi dengan pemanasan ulang kombinasi yang dibahas pada penelitian ini, yang dinyatakan dengan nilai COP dan kapasitas pendinginannya, ternyata menunjukkan adanya kenaikan nilai yang mengikuti kenaikan nilai dari suhu sumber panasnya. Dari hasil proses optimasi yang diterapkan pada strategi operasionalnya, maka pada suhu sumber panas 55 C merupakan suhu terendah yang dapat digunakan untuk mengoperasikan sistem pada saat suhu keluaran air dinginnya tetap dijaga pada suhu 9 C untuk dapat menghasilkan efek pendinginan. Peningkatan nilai unjuk kerja hasil optimasi yang paling besar terjadi pada suhu sumber

panas 55 C dengan waktu siklus keseluruhan yang lebih lama untuk mendapatkan kinerja optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Akahira, A., Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2004). Mass recovery adsorption refrigeration cycle – improving cooling capacity. *International Journal of Refrigeration*, 27(3), 225–234. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2003.10.004>
- Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Akisawa, A., Kashiwagi, T. (2003). Advanced adsorption chiller driven by low temperature heat source. *21st International Congress of Refrigeration*, 17–22.
- Alam, K. C. A., Khan, M. Z. I., Uyun, A. S., Hamamoto, Y., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2007). Experimental study of a low temperature heat driven re-heat two-stage adsorption chiller. *Applied Thermal Engineering*, 27(10), 1686–1692. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2006.07.006>
- Ally, M. R., & Sharma, V. (2018). Variability of absorption heat pump efficiency for domestic water heating and space heating based on time-weighted bin analysis. *Applied Thermal Engineering*, 130, 515–527. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2017.10.142>
- Bahrehand, H., & Bahrami, M. (2021). Optimized sorber bed heat and mass exchangers for sorption cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116348. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.116348>
- Boelman, E. C., Saha B.B., Kashiwagi, T. (1995). Experimental investigation of silica gel – water adsorption refrigeration cycle – the influence of operating condition on cooling output and COP. *ASHRAE Trans*, 358–366.
- Chua, H. T., Ng, K. C., Malek, A., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Saha, B. B. (1999). Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chiller. *International Journal of Refrigeration*, 22, 94–204.
- Chua, H. T., Ng, K. C., Malek, A., Kashiwagi, T., Akisawa, A., & Saha, B. B. (2001). Multi-bed regenerative adsorption chiller – improving the utilization of waste heat and reducing the chilled water outlet temperature fluctuation. *International Journal of Refrigeration*, 24(2), 124–136. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00078-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00078-X)
- Critoph, R. E. & R. V. (1986). Possible adsorption pairs for use in solar cooling. *International Journal of Ambient Energy*, 7(4), 183–190.
- Karagiorgas, M., & Meunier, F. (1987). The dynamics of a solid-adsorption heat pump connected with outside heat sources of finite capacity. *Heat Recovery Systems and CHP*, 7(3), 285–299. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(87\)90141-4](https://doi.org/10.1016/0890-4332(87)90141-4)
- Kashiwagi, K., Akisawa, A., Yoshida, Y., Alam, K.C.A., Hamamoto, Y. (2002). Heat driven sorption refrigerating and air conditioning chiller in Japan. *Proc. of the International Sorption Heat Pumps Conference*, 50–62.
- Khan, M. Z. I., Alam, K. C. A., Saha, B. B., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2007). Study on a re-heat two-stage adsorption chiller – The influence of thermal capacitance ratio, overall thermal conductance ratio and adsorbent mass on system performance. *Applied Thermal Engineering*, 27(10), 1677–1685. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2006.07.005>

- Mizanur Rahman, A. F. M., Ueda, Y., Akisawa, A., Miyazaki, T., Saha, B. B. (2013). Performance comparison of three-bed adsorption cooling system with optimal cycle time setting. *Heat Transfer Engineering*, 34(11-12), 1-10.
- Pinheiro, J. M., Salústio, S., Rocha, J., Valente, A. A., & Silva, C. M. (2020). Adsorption heat pumps for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109528. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109528>
- Riaz, N., Sultan, M., Noor, S., Sajjad, U., Farooq, M., Khan, M. U., Hanif, S., & Riaz, F. (2022). Recent developments in adsorption heat pumps for heating applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(4), 1-32. <https://doi.org/10.1177/16878132221089444>
- Rogala, Z. (2017). Adsorption chiller using flat-tube adsorbers - Performance assessment and optimization. *Applied Thermal Engineering*, 121, 431-442. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.059>
- Saha, B. B., Koyama, S., Choon Ng, K., Hamamoto, Y., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2006). Study on a dual-mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption chiller. *Renewable Energy*, 31(13), 2076-2090. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.10.003>
- Saha, B. B., Koyama, S., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Ng, K. C., & Chua, H. T. (2003). Waste heat driven dual-mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption system. *International Journal of Refrigeration*, 26(7), 749-757. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(03\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(03)00074-4)
- Saha, B. B., Koyama, S., Lee, J. B., Kuwahara, K., Alam, K. C. A., Hamamoto, Y., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2003). Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(8), 1249-1263. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(03\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(03)00103-4)
- Tchernev, D.I., Emerson, D. . (1988). High efficiency regenerative zeolite heat pump. *ASHRAE Trans*, 50-62.
- Tong, C. H., Choon, N. K., Malek, A., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Saha, B. B. (2000).). *A regenerative adsorption process and multi reactor regenerative adsorption chiller*.
- Wirajati, I.G.A.B., Akisawa, A., Ueda, Y., Miyazaki, T. (2015). Experimental investigation of a reheating two-stage adsorption chiller applying fixed chilled water outlet conditions. *Heat Transfer Research*, 46, 293-309.
- Wirajati, I.G.A.B., Ueda, Y., Akisawa, A., Miyazaki, T. (2014). The performance of three-bed re-heat combined adsorption chiller. *International Sorption Heat Pumps Conference*, 7.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada para mitra bestari yang telah mengevaluasi artikel-artikel dalam Jurnal Teknosains pada Volume 12, Nomor 1 Desember 2022, kami mengucapkan terima kasih kepada mitra bestari:

1. Dr. Ir. Dina Ruslanjari, M.Si
2. Prof. Ir. Suryo Purwono, MA.Sc., Ph.D
3. Dr. Fajar Sofyantoro
4. Nur Aini Masruroh, ST., M.Sc., Ph.D.
5. Ir. Fauzun, ST, MT, Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
6. Prof. Dr. Ir. Harwin Saptoadi, M.SE., IPM., ASEAN Eng.
7. Ir. Mohammad Sholichin, MT., Ph.D

Kami juga mengucapkan terima kasih kepada *International Conference on Indonesian Architecture and Planning* (ICIAP 2022) yang telah bekerjasama untuk publikasi dalam edisi Desember 2022.