

KAJIAN EKSERGI PADA MESIN PENDINGIN ADSORPSI MENGGUNAKAN PASANGAN SILIKAGEL-METANOL

Exergy Analysis Adsorption Refrigeration Using Silica gel-Methanol

Bayu Rudiyanto¹, Kamaruddin Abdullah², Armansyah H. Tambunan²

ABSTRAK

Sistem pendingin adsorpsi merupakan salah satu dari sistem pendingin yang ramah lingkungan, dimana dalam operasinya sistem ini dapat dibangkitkan menggunakan sumber energi terbarukan seperti biomassa ataupun sinar surya. Sistem pendingin adsorpsi yang digunakan dalam percobaan ini menggunakan pasangan silika gel-metanol sebagai absorben dan refrigeran. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan kinerja mesin pendingin adsorpsi intermiten pasangan silikagel-metanol dan melakukan analisis eksergi pada mesin pendingin adsorpsi intermiten pasangan silikagel-metanol. Metode penelitian diawali dengan pengujian terhadap kebocoran pada semua komponen di dalam sistem pendingin adsorpsi dan dilanjutkan dengan pengujian sistem pendingin adsorpsi menggunakan pasangan silikagel-metanol. Suhu tiap komponen yaitu generator, kondensor, evaporator dan pipa-pipa masukan dan keluaran diukur dengan menggunakan termokopel tipe C-C yang dihubungkan dengan alat perekam suhu. Sedangkan untuk analisis eksergi diawali dengan perancangan model pada masing-masing komponen dalam sistem pendingin adsorpsi intermiten. Hasil percobaan menunjukkan nilai kehilangan eksergi yang diperoleh untuk tiap proses dalam sistem pendingin adsorpsi. Nilai kerugian eksergi menggambarkan ketidak efektifan proses transfer energi dalam sistem pendinginan adsorpsi. Rincian hasil yang dicapai dari perhitungan dengan analisis eksergi memberikan data pada generator desorpsi kehilangan eksergi (exergy destroy) sebesar 35.33 Watt (90.57 %). Kondensor memberikan nilai sebesar 0.20 Watt (0.51 %). Evaporator memberikan nilai sebesar 0.07 Watt (0.18 %) dan pada generator adsorpsi memberikan nilai sebesar 3.51 %.

Kata kunci : *Mesin pendingin, sistem adsorpsi, silika gel, metanol, eksergi*

ABSTRACT

Adsorption refrigeration system (ARS) is one of environment friendly refrigerating machines, which can be operated by using renewable energy sources available locally such as solar and biomass. The experimental adsorption refrigeration system developed in this study utilizes silica gel-methanol combination as the adsorbent and refrigerant which is harmless for human being. The objectives of the research were to identify the performance of adsorption refrigeration system using silicagel-methanol and to conduct exergy analysis of adsorption refrigeration system. The research was started by testing of ARS and than developing energy and exergy balance to determine the exergy loss from the ARS. The results show that the value of exergy loss was obtained for each process in ARS. The exergy loss expresses the most ineffective operation of ARS. The exergy loss in desorption process was found 35.33 Watt (90.57 %). The Condensation process was found 0.2 Watt (0.51 %). The evaporation was found 0.07 Watt (0.18 %) and adsorption process was found 1.37 Watt (3.51 %).

Keywords : *Refrigerating machine, adsorption system, silica gel, methanol, exergy*

¹ Program Studi Keteknikan Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Politeknik Negeri Jember, Jl. Mastrip PO.BOX. 164, Jember

² Jurusan Keteknikan Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian, Bogor, Jl. Darmaga, Bogor

PENDAHULUAN

Dunia Internasional saat ini dipermasalahkan oleh terjadinya pemanasan global (*global warming*) akibat permukaan bumi tidak terlindungi lagi dari terpaan langsung sinar ultraviolet matahari karena rusaknya sebagian lapisan ozon. Lapisan ozon yang mengalami kerusakan tersebut diantaranya disebabkan oleh penggunaan *fluorocarbon* (CFC, HCFC, HFC) sebagai refrigeran dalam bidang pendinginan. Penolakan terhadap penggunaan *fluorocarbon* telah tertuang dalam konvensi Wina dan Protokol Montreal 1987, dengan keharusan penghentian produksi dan penggunaan refrigeran *fluorocarbon*. Selain itu permasalahan besar lain yang terjadi adalah krisis energi dimana ditandai dengan meningkatnya harga minyak dunia, menunjukkan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil terutama minyak bumi.

Melihat dampak yang berkepanjangan dari pemakaian refrigeran (*freon*) dan terjadinya krisis energi maka perlu kiranya mencari terobosan baru teknologi pendinginan (refrigerasi) alternatif yang mampu meningkatkan keamanan dan secara ekonomis lebih murah dan mudah didapatkan. Salah satu sistem pendinginan yang bisa dijadikan alternatif adalah sistem pendinginan adsorpsi. Pendinginan secara adsorpsi mempunyai karakteristik tersendiri dimana sistem kompresor mekanik akan digantikan dengan sistem adsorpsi dan memerlukan sumber energi panas (kalor) untuk menghasilkan siklus pendingin (*heat-operated cycle*) (Stoecker, 1992). Teknik pendinginan ini memiliki beberapa keunggulan yaitu ramah lingkungan karena refrigeran yang digunakan tidak berbahaya terhadap lingkungan. Selain itu sistem ini memerlukan pemakaian sumber listrik yang lebih kecil. Teknik pendinginan ini memerlukan sumber energi panas sebagai penghasil siklus pendinginan. Beberapa sumber energi tersebut dapat diperoleh dari biomassa dari hasil limbah pertanian atau juga energi radiasi surya. Metode pendinginan secara adsorpsi menurut aliran fluidanya terbagi menjadi dua yaitu aliran fluida secara kontinyu dan secara tidak kontinyu (*intermitten*). Pada aliran fluida kontinyu terdapat bagian yang berfungsi sebagai *generator - adsorber* secara bergantian, sedangkan aliran fluida yang tidak kontinyu (*intermitten*) hanya terdapat satu bagian yang berfungsi sebagai *generator-adsorber*.

Menurut kaidah termodinamika I yang merupakan konsep kekekalan energi dimana energi dapat dikonversikan dari satu bentuk ke bentuk lain dan tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Secara umum, keseimbangan energi tidak memberikan informasi mengenai mutu dan kualitas dari energi yang masuk atau keluar dari batas sistem tersebut. Dalam hukum termodinamika II dikenal konsep eksergi yang berguna untuk menganalisis sistem termal, karena eksergi adalah suatu ukuran mutu atau nilai dari energi dan

dalam sistem termal eksergi dapat dimusnahkan. Hukum termodinamika II menyatakan bahwa sebagian dari eksergi yang memasuki suatu sistem termal akan hilang oleh adanya *irreversibility* (ketakmampubalikan) dari sistem tersebut. Hal ini dapat dijelaskan menggunakan analisis keseimbangan eksergi pada sistem termal. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, energi hanya dapat dikonversi dari satu bentuk ke bentuk yang lainnya, sedangkan eksergi adalah bagian dari energi, yakni kerja minimum yang diperlukan agar proses dapat berlangsung (Cengel, 2002). Dengan demikian antara energi dan eksergi saling terkait.

Pada kenyataannya potensial energi untuk digunakan yang terdapat dalam satu sistem akan mengalami penurunan akibat adanya sifat *irreversibility*. Hal ini juga berlaku dalam sistem refrigerasi, karena pendinginan secara umum merupakan proses pengambilan kalor suatu ruang atau benda untuk menurunkan suhunya dengan jalan memindahkan kalor yang terkandung dalam benda tersebut (Kamaruddin dkk., 1998). Untuk mengetahui besarnya energi yang dapat dikonversikan menjadi kerja secara cermat, mengetahui lokasi dan besarnya energi yang hilang dan tak terpakai digunakan suatu metode analisis eksergi (Yumrutas, 2002). Berdasarkan hal tersebut, dirumuskan tujuan penelitian yaitu: (1) untuk mendapatkan kinerja mesin pendingin tipe adsorpsi *intermitten* dengan kombinasi silika gel-metanol, dan (2) melakukan analisa eksergi pada mesin pendingin adsorpsi *intermitten* dengan kombinasi silika gel-metanol.

BAHAN DAN METODE

Tempat

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bersama Lui-kopo dan Laboratorium Energi dan Elektrifikasi Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian (FATETA), Institut Pertanian Bogor.

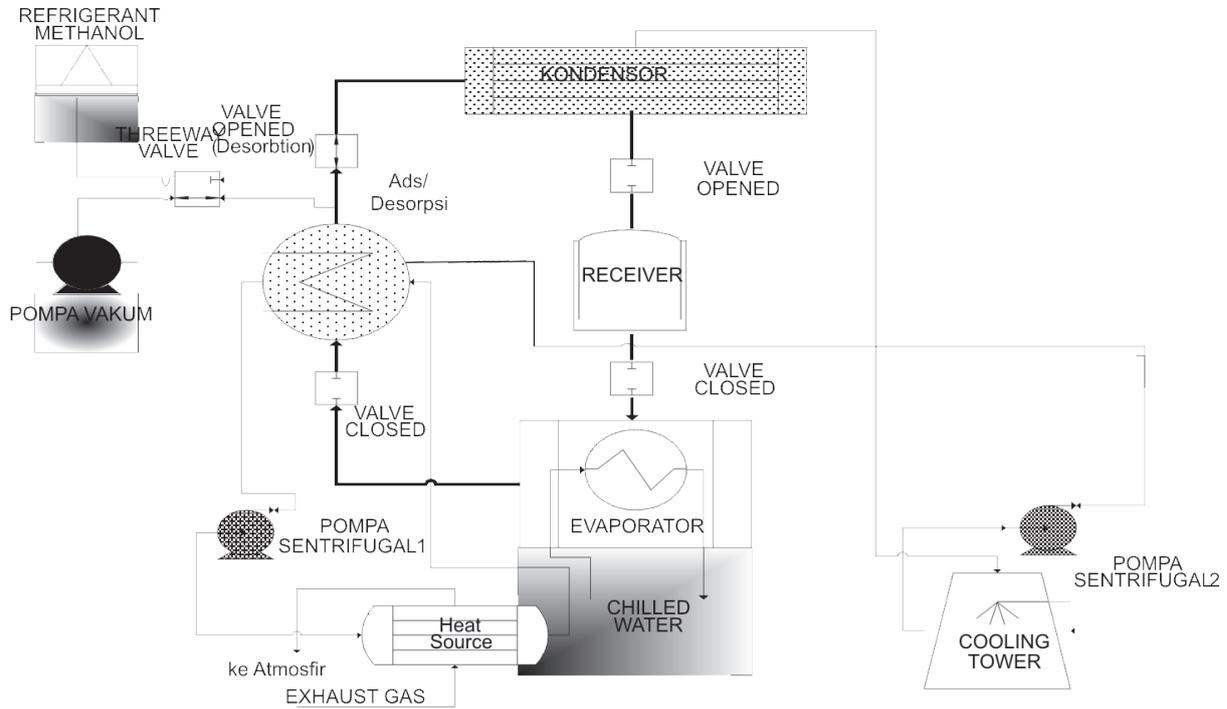
Bahan dan Peralatan

Skema sistem pendingin adsorpsi *intermitten* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat di Gambar 1.

Refrigeran dan adsorber. Refrigeran yang digunakan adalah metanol (CH_3OH) dan adsorben yang digunakan silika gel. Mesin pendingin tipe adsorpsi *intermitten* silika gel metanol ini terdiri dari:

a. Generator

Generator terbuat dari *stainless steel*, yang mana terdapat 8 buah sekat tempat silika gel, dan juga berfungsi sebagai tempat penyaluran air panas serta air dingin yang posisinya terdapat pada bagian dinding generator dan bagian tengah generator. Pada bagian



Gambar 1. Skema sistem pendingin adsorpsi intermitten

luar dan dalam dipasang termokopel yang digunakan sebagai alat pengukuran temperatur yang terdapat di dalam generator.

b. Kondensator

Kondensator terbuat dari *stainless steel* dan bagian tutup terbuat dari *acrylic* dengan ketebalan 1 cm, diameter 21 cm. Pada kondensator dipasang 4 buah termokopel yang digunakan untuk mengetahui temperatur yang ada di dalam kondensator. Selain itu pada bagian ini di tempatkan saluran pipa dingin yang berasal dari *cooling tower*.

c. Receiver (Pengukur kondensat)

Receiver terbuat dari kaca dengan ukuran tebal, diameter, dan tinggi masing-masing 0,3 cm x 5,7 cm x 51 cm sedangkan pada bagian bawahnya terdapat katup yang digunakan untuk mengalirkan refrigeran yang tertampung di receiver menuju bagian evaporator.

e. Evaporator

Evaporator terbuat dari *stainless steel* dengan tutupnya terbuat dari *acrylic*. Pada bagian ini berfungsi tempat untuk menyalurkan kembali metanol ke generator sekaligus menghubungkan dengan ruang *Chiller*.

Komponen pendukung mesin pendingin. Mesin diesel yang dilengkapi dengan *heat exchanger*, digunakan sebagai penghasil panas untuk memanaskan generator dalam proses regenerasi mesin pendingin.

1. Pompa air, dipergunakan untuk mengalirkan air sebagai penukar panas pada generator dan kondensator, pompa yang digunakan memiliki daya 90 W tegangan 220V.
2. Pompa vakum, digunakan untuk memvakumkan alat pendingin adsorpsi.
3. Menara pendingin, digunakan untuk menghilangkan panas pada air dan menurunkan temperatur air, pada akhirnya air dingin hasil olahan dari menara pendingin ini akan dialirkan menuju generator pada proses adsorpsi dan ke kondensator pada saat desorpsi.
4. *Chiller*, digunakan untuk tempat beban pendinginan (air).
5. *Cold trap*, alat ini digunakan untuk menangkap uap air yang mungkin dapat ditarik oleh mesin pompa vakum.

Prosedur Percobaan

Pengujian kebocoran mesin. Sebelum digunakan mesin beserta perpipaan perlu diuji kebocoran tiap bagian dengan cara diberi tekanan tinggi dan memasukkan ke dalam air. Setelah tidak ada kebocoran, kemudian mesin dirangkai dan di lakukan pemvakuman dengan mesin *vacuum*.

Pengisian metanol. Pengisian metanol ke dalam tabung receiver dilakukan dengan memvakumkan seluruh unit selama 2 jam sampai tekanan 0-1 mmHg dan menutup semua valve. Selang *vacuum* dihubungkan dengan tabung erlemeyer yang berisi metanol dan telah ditutup bagian atasnya dengan karet penutup. Hal ini dilakukan agar metanol dalam tabung

elemeyer tidak cepat menguap. Setelah itu kran pemvakuman dibuka sedikit demi sedikit sehingga metanol masuk kedalam receiver.

Pengukuran beban pendinginan. Pengukuran beban pendinginan dengan menggunakan kotak kaca sebagai tempat penampungan air yang terdapat diluar sistem mesin pendingin dengan ukuran 29 cm x 29 cm x 50 cm. Beban ini dihubungkan dengan koil pemasukan dan pengeluaran air dari evaporator. Air pendingin dari kotak kaca akan dipompakan menggunakan pompa akuarium ke dalam koil yang terdapat di dalam evaporator, kemudian dialirkan kembali kedalam kotak kaca. Pengukuran dilakukan dengan menempatkan termokopel pada bagian pemasukan dan pengeluaran air dari koil evaporator.

Pengujian Alat. Pengujian ini dilakukan untuk melihat keseluruhan proses pada tiap-tiap komponen dalam mesin pendingin adsorpsi. Pada sistem pendingin adsorpsi ini terdapat dua proses yang harus dilalui. Setelah metanol dimasukkan kedalam generator, dilakukan proses desorpsi sampai selesai dan kemudian dilanjutkan dengan proses kedua yaitu proses adsorpsi. Pada penelitian ini kondisi operasional yang digunakan antara lain :

- Suhu pemanas dihasilkan oleh gas buang melalui *heat exchanger* dengan rata-rata temperatur kurang dari 90 °C
- Debit fluida kerja air generator 0,066 liter/detik.
- Debit fluida kerja air kondensor 0,150 liter/detik
- Pengukuran menggunakan beban pendinginan.
- Debit fluida kerja air beban pendingin 0,035 liter/detik.

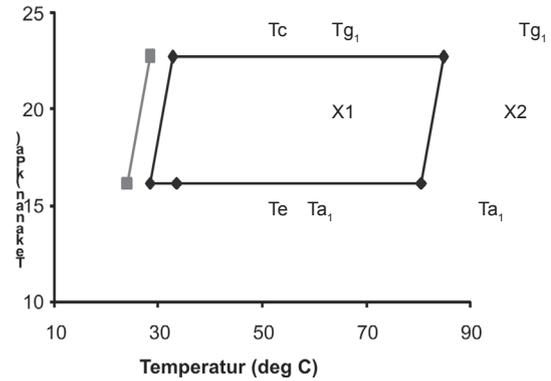
HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Kinerja Mesin Pendingin Adsorpsi

Pengujian mesin pendingin adsorpsi dimulai dari siklus desorpsi-kondensasi, dimana sebelumnya dilakukan proses pemvakuman pada mesin pendingin dan dibiarkan selama kurang lebih 2 jam untuk melihat kebocoran. Setelah itu dilakukan pengisian metanol ke dalam generator. Pada percobaan 1, dimasukkan metanol sebanyak 360 ml, setelah sebelumnya melakukan penutupan pada semua katup yang menghubungkan tiap komponen dalam mesin pendingin adsorpsi. Kemudian proses desorpsi-kondensasi dimulai dengan langkah awal yaitu memanaskan generator (*preheating*) menggunakan air yang dihasilkan oleh gas buang diesel melalui *heat exchanger* sehingga metanol yang terikat dengan silikagel di dalam generator akan menguap (desorpsi) dan masuk kedalam ruang kondensor dimana diruang ini terjadi proses kondensasi sehingga dihasilkan metanol cair (kondensat) dengan konsentrasi tertentu yang ditampung didalam tabung receiver. Setelah proses desorpsi-kondensasi selesai, kemudian dilanjutkan dengan proses

evaporasi-adsorpsi dengan terlebih dahulu menutup katup yang menghubungkan antara generator-kondensor dan katup yang menghubungkan kondensor dan tabung receiver.

Pada beberapa percobaan yang telah dilakukan maka didapatkan hasil grafik P-T-X siklus desorpsi-adsorpsi sebagai berikut:



Gambar 2. Grafik P-T-X tekanan-temperatur silika gel-(MeOH) percobaan 1.

Gambar 2 menunjukkan proses dari Ta₂-Tg₁-Tg₂, yang berlangsung dalam generator dan kondenser dengan konsentrasi awal X1. Pada siklus ini silika gel dan metanol dipanaskan dari suhu awal Ta₂ ke suhu Tg₁ kemudian setelah terjadi penguapan mencapai suhu Tg₂ pada tekanan kondenser Pc. Pada kondisi ini konsentrasi metanol sudah berubah dari X1 menjadi X2. Sedangkan Pada proses Tg₂-Ta₁-Ta₂, refrigeran metanol berekspansi karena diserap oleh silika gel yang berada dalam generator-adsorber sambil mengambil panas dari beban sebesar panas laten penguapannya. Proses ini berlangsung pada tekanan rendah evaporator Pe. Proses Tg₂-Ta₁-Ta₂ ini terjadi di dalam generator, dengan konsentrasi X1 sambil didinginkan akan menyerap zat pendingin metanol dari evaporator sehingga tekanan dalam evaporator menurun dari Pc ke Pe dan suhu evaporator secara bertahap menuju suhu Te. Pada saat penyerapan oleh silika gel dalam generator-adsorber tadi mengakibatkan terjadinya penguapan zat metanol yang mengambil panas penguapan dari beban pendingin yang dihubungkan dengan evaporator. Sehingga secara aktual dari grafik diatas (Gambar 2) diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 1. Temperature dan tekanan generator percobaan 1

Keterangan	Temperatur (°C)	Temperatur K	Tekanan kPa
Ta2	33.60	306.60	16.1587
Te	24.05	297.05	16.1587
Tg2	84.90	357.90	22.6915
Tc	28.38	301.38	22.6915

Pada Gambar 2 dan Tabel 1 (grafik P-T-X secara teoritis), dengan melihat grafik hubungan tekanan dan temperatur metanol silika gel akan didapatkan nilai konsentrasi di $X1 = 0,124$ dan pada konsentrasi $X2 = 0,033$. Besarnya tekanan awal dan temperatur di $Tg2$ akan mempengaruhi karakter desorpsi dan kapasitas pendinginan pada siklus.

Keseimbangan Panas (Heat Balance)

Energi yang diperlukan dalam siklus pendinginan adsorpsi dalam bentuk panas terdiri dari panas generasi (desorpsi), panas kondensasi, panas evaporasi dan panas pada saat adsorpsi. Panas generasi diperlukan untuk melepaskan refrigeran dari absorber. Panas kondensasi yang dilepaskan oleh uap refrigerasi diambil dari koil pendingin. Panas kondensasi tergantung dari suhu kondensasi dan banyaknya kondensat yang dikondensasikan di kondensor. Sedangkan panas evaporasi merupakan panas yang dibutuhkan untuk menguapkan refrigeran di ruang evaporator untuk di adsorpsi kembali oleh silika didalam tabung generator. Energi adsorpsi merupakan energi yang diperlukan untuk mengikat kembali refrigeran oleh absorber.

Analisis keseimbangan panas diperlukan untuk melihat kebutuhan energi mesin pendingin, untuk setiap siklus.

Dengan menggunakan pendekatan rumus penukar panas (heat exchanger):

$$Q = m.Cp.dT \text{ atau } Q = m.(h_{in} - h_{out}) \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- Q = laju panas (kW)
- m = laju alir (kg/dt)
- Cp = panas jenis (kJ/kg K)
- dT = beda temperatur (K)
- h_{in} = enthalpi masuk (kJ/kg)
- h_{out} = enthalpi keluar (kJ/kg)

maka diperoleh hasil seperti terlihat di Tabel 2.

Dari tabel 2 didapatkan jumlah energi yang masuk pada sistem yang merupakan penjumlahan antara Q gen-desorpsi (Qg) dan Q evaporator (Qe) sebesar 275,99 W, sedangkan

jumlah energi yang keluar merupakan penjumlahan antara Q kondensor (Qc) dan Q gen-adsorpsi (Qa) sebesar 245,84 W. Dari data tersebut diatas terjadi selisih jumlah energi sebesar 30,15 Watt. Sedangkan besar energi yang diperlukan untuk proses regenerasi sebesar 1366,61 kJ, proses evaporasi 409,32 kJ, proses kondensasi 754,54 kJ dan proses adsorpsi sebesar 794,25 kJ.

Coefficient of Performance (COP)

Secara teoritis siklus mesin pendingin adsorpsi dapat didefinisikan dari siklus Carnot (Cortez et al., 1997 diacu dalam Martin, 1993) untuk siklus ini diasumsikan proses berjalan secara adiabatik antara kondensor dan evaporator. Dari kesetimbangan energi, siklus Carnot dapat dituliskan sebagai berikut:

$$COP_{ideal} = \frac{T_e(T_g - T_o)}{(T_o - T_e) \times T_g} \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- Te = Temperatur evaporator (K)
- Tg = Temperatur generator (K)
- To = Temperatur lingkungan (K)

Sehingga nilai yang didapatkan dari data pengujian untuk besaran *Coefficient of Performance ideal* (COP_{ideal}) pada masing-masing percobaan berturut-turut adalah 1,11, 1,63, 1,55.

Sedangkan nilai COP aktual dari pengujian diberikan dengan rumusan, sebagai berikut :

$$COP_{real} = \frac{Q_e}{Q_g} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

- Qe = laju panas evaporator (kJ/dt)
- Qg = laju panas generator (kJ/dt)

Hasil dari perhitungan didapatkan untuk masing-masing percobaan diberikan berturut-turut adalah 0,4, 0,16, 0,23.

Perbedaan besaran nilai COP aktual disebabkan oleh beberapa faktor antara lain,

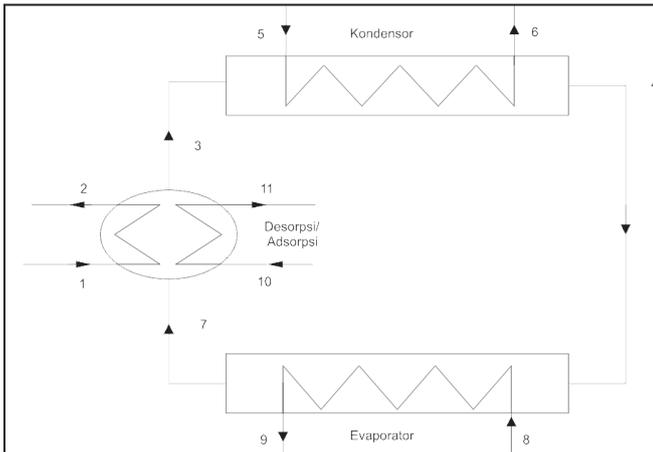
- Temperatur generator
- Beban pendinginan
- Laju aliran penukar panas

Tabel 2. Perhitungan kesetimbangan energi

Komponen	Laju alir kg/s	h_{in} kJ/kg	h_{out} kJ/kg	Q Watt	Qe+Qg Watt	Qc+Qa Watt	ΔQ
Gen. Desorpsi	0.03	366.33	363.05	216.92			
Evaporator	0.04	119.52	117.85	59.07	275.99		
Kondensor	0.15	110.07	109.28	119.77			
Gen. Adsorpsi	0.15	117.81	116.97	126.07		245.84	30.15

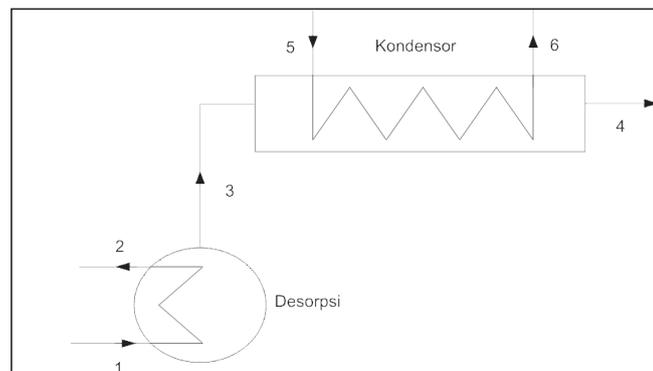
Analisis Eksergi (exergy analysis) Mesin Pendingin Adsorpsi

Analisis eksergi diperlukan untuk melihat ketersediaan energi yang mampu diambil atau digunakan untuk sebuah proses. Pada sistem pendingin adsorpsi ketersediaan dan penggunaan energi dapat dilihat pada masing-masing komponen atau masing-masing proses. Sehingga aliran proses pada sistem pendingin adsorpsi dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 3. Skema sistem pendingin adsorpsi *intermitten*.

Sistem pendingin adsorpsi *intermitten*, proses yang terjadi terdiri dari 2 proses yaitu proses generasi desorpsi-kondensasi dan proses evaporasi-adsorpsi. Sehingga proses generasi desorpsi-kondensasi yang terjadi diperlihatkan pada gambar berikut ini:



Gambar 4. Skema proses generasi adsorpsi-kondensasi.

Sehingga persamaan kesetimbangan ekserginya diperoleh sebagai berikut:

Generator Desorpsi

$$\Psi_1 - T_0 S_{gen} = \Psi_2 + \Psi_3$$

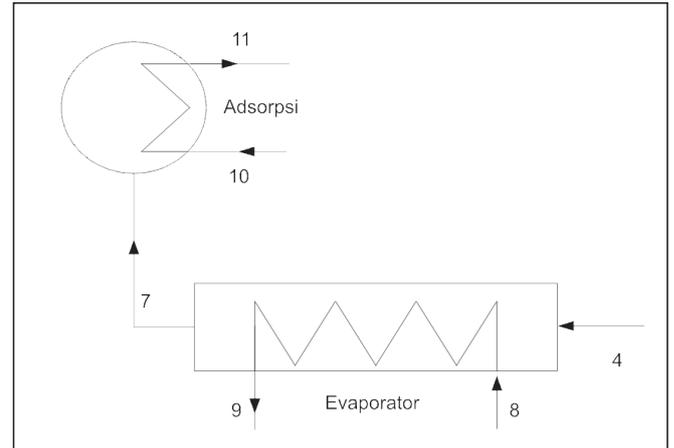
$$m_1 (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0) - T_0 S_{gen} = m_2 (h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0) + m_3 (h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0) \dots \dots \dots (4)$$

Kondensator

$$\Psi_3 + \Psi_5 - T_0 S_{gen} = \Psi_4 + \Psi_6$$

$$m_3 (h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0) + m_5 (h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0) - T_0 S_{gen} = m_4 (h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0) - m_6 (h_6 - h_0) - T_0 (s_6 - s_0) \dots \dots \dots (5)$$

Sedangkan untuk proses evaporasi-adsorpsi diperlihatkan pada gambar berikut ini:



Gambar 5. Skema proses evaporasi-adsorpsi

Kesetimbangan ekserginya diperoleh sebagai berikut:

Evaporator

$$\Psi_4 + \Psi_8 - T_0 S_{gen} = \Psi_7 + \Psi_9$$

$$m_4 (h_4 - h_0) - T_0 (s_4 - s_0) + m_8 (h_8 - h_0) - T_0 (s_8 - s_0) - T_0 S_{gen} = \dots \dots \dots (6)$$

$$m_5 (h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0) + m_9 (h_9 - h_0) - T_0 (s_9 - s_0)$$

Generator Adsorpsi

$$\Psi_7 + \Psi_{10} - T_0 S_{gen} = \Psi_1$$

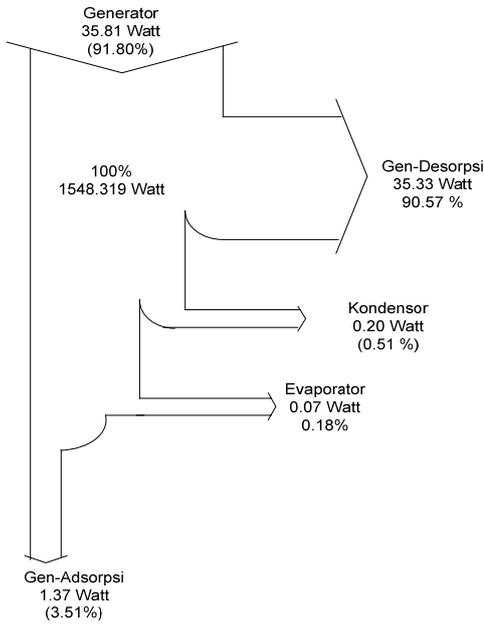
$$m_7 (h_7 - h_0) - T_0 (s_7 - s_0) + m_{10} (h_{10} - h_0) - T_0 (s_{10} - s_0) - T_0 S_{gen} = \dots \dots \dots (7)$$

$$m_1 (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)$$

maka dari persamaan diatas diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 3. Eksergi dan kehilangan eksergi sistem pendingin adsorpsi

Komponen	Titik	Eksergi (+)			Irreversibility		Eff. Eksergi (%)
		(Watt)	(Watt)	%	(Watt)	(%)	
Gen-Des	1	1562.64					
	2	1526.83	35.81	91.80			
	3	0.48			35.33	90.57	1.34
Kondensator	4	0.28					
	5	14.88					
Evaporator	6	13.86	1.02	2.61	0.20	0.51	80.37
	7	0.07					
	8	2.20					
Gen-Ads	9	2.95	0.74	1.90	0.07	0.18	90.55
	10	4.59					
	11	3.15	1.44	3.69	1.37	3.51	4.73
Total		1584.319	39.01	100.00	36.97	94.77	



Gambar 6. Diagram aliran eksergi Sistem Pendingin Adsorpsi pengujian 2

Analisis keseimbangan eksergi memberikan nilai ketersediaan energi yang mampu digunakan untuk proses, sekaligus memberikan nilai atau besaran *irreversibilitas* pada suatu proses pada tiap komponen. Perubahan asupan eksergi ke dalam sistem akan memberikan perubahan transfer eksergi dan juga kehilangan eksergi (*irreversibility*).

Dari Tabel 3 didapatkan bahwa ketersediaan eksergi sebagai asupan di generator untuk pengujian 2 sebesar 35,81 Watt, dan kehilangan eksergi (*exergy destroy*) sebesar 35,33 Watt atau 90,57 %. Kondensor terjadi kehilangan eksergi sebesar 0,20 Watt (0,51 %), evaporator sebesar 0,07 Watt (0,18 %) dan generator adsorpsi sebesar 1,37 Watt (3,51 %). Kecilnya kehilangan eksergi akan memberikan nilai efisiensi eksergi yang lebih besar. Dari masing-masing komponen pada sistem pendingin adsorpsi didapatkan nilai efisiensi eksergi yaitu untuk generator desorpsi sebesar 1,34 %, kondensor 80,37 %, evaporator 90,55% dan generator adsorpsi sebesar 4,73 %. Beberapa faktor yang mempengaruhi kehilangan eksergi adalah suhu awal, suhu lingkungan, panas yang dipindahkan dan perubahan entropi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil yang diperoleh dari kajian ini adalah sebagai berikut :

1. Pemanfaatan gas buang dari diesel dengan tekanan kerja berkisar antara 16,13-24,3 kPa dapat digunakan sebagai sumber pembangkitan panas pada mesin pendingin adsorpsi untuk melepaskan metanol dari silika gel

dengan menghasilkan COP secara berturut-turut adalah 0,4, 0,16, 0,23.

2. Temperatur terendah yang dapat dihasilkan oleh evaporator untuk tiga kali pengujian pada mesin ini diperoleh secara berturut-turut adalah 24,50°C pada tekanan 105,4 torr (14,052 kPa), 20,5°C pada tekanan 100,3 torr (13,372 kPa) dan 27°C pada tekanan 117,10 torr (15,612 kPa), sedangkan temperatur beban mampu diturunkan sebesar antara 1°C - 3°C.
3. Kehilangan eksergi terbesar pada sistem pendingin adsorpsi terjadi pada generator. Besarnya kehilangan eksergi pada komponen generator menunjukkan tidak maksimalnya transfer eksergi untuk proses pelepasan dan penyerapan metanol di komponen tersebut.

Saran

1. Untuk mengurangi kehilangan eksergi atau irreversibilitas perlu pengaturan pada laju aliran sehingga akan meningkatkan efisiensi eksergi.
2. Untuk mengurangi kehilangan panas perlu diberikan isolasi untuk semua komponen mesin pendingin adsorpsi.
3. Perlu memaksimalkan *cooling tower* untuk menghasilkan efek kondensasi dan efek adsorpsi di generator menjadi lebih baik.

DAFTAR NOTASI

$T_{w,in}$: Suhu air masuk
$T_{w,out}$: Suhu air keluar
T_{sg1}	: Suhu awal silika gel
T_{sg2}	: Suhu akhir silika gel
T_{g1}	: Suhu awal generator
T_{g2}	: Suhu akhir generator
$T_{met,1}$: Suhu awal metanol
$T_{met,2}$: Suhu akhir metanol
T_{sat}	: Suhu saturated
T_0	: Suhu lingkungan
$m_{w,in}$: Massa air masuk
$m_{w,out}$: Massa air keluar
m_{sg}	: Massa silika gel
m_{met}	: Massa metanol
m_g	: Massa generator
Cp_{air}	: Panas jenis air
Cp_{sg}	: Panas jenis silika gel
Cp_{met}	: Panas jenis metanol
Cp_g	: Panas jenis generator
Δh_{fg}	: Panas laten
$h_{w,in}$: Enthalpi air masuk
$h_{w,out}$: Enthalpi air keluar
$h_{met,in}$: Enthalpi metanol masuk
$h_{met,out}$: Enthalpi metanol keluar
$S_{w,in}$: Entropi air masuk
$S_{w,out}$: Entropi air keluar

$S_{met,in}$: Entropi metanol masuk
$S_{met,out}$: Entropi metanol keluar
ψ	: Eksergi
U	: Koefisien pindah panas menyeluruh

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI) Departemen Pendidikan Nasional melalui Hibah Penelitian Tim Pascasarjana (HPTP) No. 317/SP3/PP/DP2M/II/2006.

DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Y.A. (2003). *Heat Transfer, A Practical Approach*. Second Edition. McGraw Hill, New York.
- Holman, J.P. (1995). Perpindahan kalor. *Dalam: Jasfri E (penerjemah). Heat Transfer*. Erlangga, Jakarta.
- Oertel, K. dan Fischer, M. (1998). Adsorption cooling system for cold storage using methanol silicagel. *Applied Thermal Engineering* **18**: 773-786.
- Kamaruddin, A. (2005). Pengembangan Teknologi Energi Terbarukan Di Indonesia. *Keteknikan Pertanian* **19**: 2.
- Tambunan, A.H. (2005). *Studi Eksergitas Pemanfaatan Energi Untuk Sistem Pendingin/Pembeku Hasil Pertanian (Usulan Penelitian Hibah Pascasarjana)*. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Stoecker, W.F. dan Jones, J.W. (1982). *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Erlangga, Jakarta.
- Shukuya, M. dan Hammache, A. (2002). Introduction to the concept of exergy – for a better understanding of low-temperature – heating and high temperature – cooling system. *VTT Tiedotteita* **2158**: 10-14
- Yumrutas, R., Kunduz, M. dan Kanoglu, M. (2002). Exergy analysis of vapor compression refrigeration system. *Exergy* **2**: 266-272.