

UNJUK KERJA SISTEM PENDINGIN ADSORPSI DENGAN PASANGAN KARBON AKTIF-METANOL SEBAGAI ADSORBEN-ADSORBAT

Ivand Hintingo¹, Awaludin Martin²

Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau

¹ivand_90@yahoo.com,² awaludinmartin@yahoo.com

ABSTRACT

The air conditioning system that we used now may contribute to the effects of global warming and high energy consumption. One solution is to use the adsorption cooling system. Adsorption refrigeration system using activated carbon as adsorbent and methanol as adsorbate aims to replace the existing cooling system today. Targets to be achieved in this research is to analyze the adsorption cooling system that can replace vapor compression system that uses a refrigerant that can damage the ozone layer, with variation of desorption time and the mass flow rate of water in the evaporator to see its effect on the value of the COP on the system. Adsorbate or refrigerant used in the cooling system is methanol and adsorbent used in adsorption cooling system is activated carbon. The method used in this study is experiment. Experiment method conducted to determine the effect of desorption time variations and variations in the mass flow rate of water in the evaporator to the value of the COP. The highest COP is the variation of water mass flow rate 0,016 kg / s that is 0,099.

Key Word : Adsorption, COP, Activated Carbon, Methanol, Desorption Time

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Isu pemanasan global dan krisis energi merupakan dua masalah besar yang dihadapi manusia. Pemanasan global yang terjadi saat ini merupakan efek dari perkembangan teknologi, yaitu salah satunya adalah penggunaan CFC (*chloroflourocarbon*) dalam sistem pendingin. CFC merupakan satu-satunya refrigeran yang mempunyai COP yang paling tinggi diantara refrigeran lain. Namun sifat CFC yang merusak lapisan ozon dan merusak lingkungan, harus disadari untuk dicari pengganti refrigeran tersebut dalam sistem refrigerasi. Pemanasan global yang dibiarkan terus menerus akan mempunyai dampak yang sangat berbahaya bagi kelangsungan hidup seluruh makhluk hidup di bumi.

Mesin pendingin merupakan salah satu mesin yang berkontribusi terhadap

pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) melalui kebocoran dan buangan refrigeran (yang bersifat gas rumah kaca) ke lingkungan. Proses pendinginan yang digunakan selama ini kebanyakan menggunakan sistem kompresi uap dimana terdapat beberapa kekurangan yaitu menyebabkan pencemaran lingkungan, penipisan lapisan ozon, dan pemakaian energi yang besar selama proses berlangsung dimana pada saat ini keadaan energi dunia semakin lama semakin menipis.

Gas-gas yang memiliki potensi efek rumah kaca dikategorikan dalam zat *GWP*, sedangkan zat perusak lapisan ozon disebut sebagai *ODS* (*Ozon Depleting Substance*). Dengan demikian terdapat tiga hal yang mempengaruhi perkembangan mesin refrigerasi saat ini, yakni : (1) Penghematan energi, (2) Tuntutan refrigerasi *non-ODS*, dan (3) Tuntutan refrigeran *non-GWP* (Indartono, 2014).

Pendingin dengan sistem adsorpsi merupakan salah satu alternatif yang ramah lingkungan untuk menjawab isu dan masalah yang terjadi di atas. Salah satunya adalah mesin pendingin adsorpsi dengan pasangan adsorben-adsorbatnya adalah karbon aktif dan metanol. Dimana pada sistem adsorpsi ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan sistem pendingin kompresi uap yaitu dari segi pemakaian energi yang dapat menggunakan energi matahari ataupun energi panas yang dihasilkan dari panas mesin sehingga panas yang terbuang dapat dimanfaatkan. Dan juga refrigeran yang digunakan adalah metanol yang bersifat *non-GWP* dan bersifat *non-ODS*.

Namun mesin pendingin adsorpsi ini masih memiliki COP yang relatif kecil jika dibandingkan dengan sistem refrigerasi mekanik, waktu desorpsi yang belum tepat agar adsorbat dapat terdesorpsi semuanya, dan sistem pendingin adsorpsi ini masih dalam tahap penelitian yang lebih lanjut baik di dalam dan di luar negeri, namun sistem refrigerasi adsorpsi ini diyakini dapat menjawab permasalahan pemanasan global dan krisis energi yang terjadi saat ini.

Saputra (2008) melakukan penelitian sistem pendingin adsorpsi dengan pasangan adsorben dan adsorbatnya adalah karbon aktif dan metanol, temperatur metanol terendah yang mampu dicapai adalah $9,7^{\circ}\text{C}$ dan menggunakan karbon aktif berbahan dasar cangkang kelapa sawit. Temperatur yang ingin dicapai adalah 0°C , hal ini menunjukkan masih jauh perbedaan temperatur yang didapatkan dengan temperatur yang diharapkan. Penyebab tidak tercapainya temperatur yang diharapkan adalah karena kualitas karbon aktif yang kurang bagus dan tidak dilakukan penelitian terhadap nilai kapasitas penyerapan karbon aktif terhadap metanol (Saputra, 2008). Taufan (2008) menghasilkan temperatur evaporasi terendah yaitu 14°C dengan menggunakan metanol sebanyak 250 mL tanpa memperhitungkan dengan jumlah karbon

aktif yang ada, sehingga peneliti beranggapan bahwa terjadi kekurangan metanol. Kemudian peneliti menyarankan untuk menambahkan jumlah metanol agar tidak terjadi kekurangan.

Ginting (2008) melanjutkan penelitian yang dilakukan oleh Taufan (2008) menghasilkan temperatur evaporasi terendah yaitu $9,6^{\circ}\text{C}$. Peneliti menggunakan metanol sebanyak 1.000 mL juga tanpa melakukan perhitungan terhadap jumlah karbon aktif yang ada. Ariyono (2008) melakukan penelitian mendapatkan temperatur evaporasi terendah $21,9^{\circ}\text{C}$.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan masih jarang yang melakukan variasi waktu desorpsi, dimana waktu desorpsi akan mempengaruhi nilai COP pada sistem, oleh karena itu dengan penelitian yang akan dilakukan ini peneliti akan membahas tentang variasi waktu desorpsi terhadap nilai COP dengan pasangan karbon aktif-metanol sebagai adsorben-adsorbat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari uraian di atas maka permasalahan yang akan diteliti adalah :

1. Bagaimana hasil pengaruh variasi waktu desorpsi terhadap nilai COP?
2. Bagaimana hasil pengaruh variasi \dot{m} air pada evaporator terhadap nilai COP?
3. Bagaimana hasil pengaruh variasi waktu desorpsi dan \dot{m} air terhadap temperatur dan tekanan yang dapat dicapai?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan hasil yang akurat maka peneliti membatasi masalah sebagai berikut:

1. Karbon aktif yang digunakan merupakan karbon aktif yang terbuat dari batubara produksi Carbotech dari Jerman.
2. Metanol yang digunakan adalah metanol berkadar 98%.
3. Kalor yang disalurkan untuk memanaskan adsorben pada saat

desorpsi adalah air panas dari *heater* dengan temperatur 90 °C dan untuk mendinginkan adsorben pada saat adsorpsi adalah air yang dalam temperatur lingkungan yaitu 25±2°C.

4. Waktu adsorpsi pada adsorber adalah 30 menit.
5. Variasi waktu desorpsi pada adsorber adalah 30 menit, 60 menit dan 90 menit.
6. Variasi \dot{m} air pada evaporator adalah 0.016 kg/s, 0.02kg/s, dan 0.023 kg/s dengan waktu desorpsi 90 menit.
7. Pengujian pendingin adsorpsi dilakukan dalam Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau dengan tekanan sistem adalah tekanan vakum yang mendekati -76 cmHg.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui nilai COP terhadap variasi waktu desorpsi dari adsorber.
2. Mengetahui nilai COP terhadap variasi \dot{m} air pada evaporator.
3. Mengetahui temperatur dan tekanan pada sistem yang dapat dicapai dengan variasi waktu desorpsi dan variasi \dot{m} air.

1.5 Manfaat

Berdasarkan tujuan dari penelitian ini, maka manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

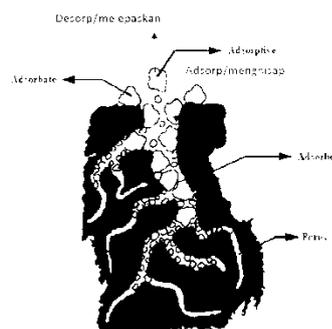
1. Bagi masyarakat agar dapat mengetahui adanya sistem pendingin yang lebih ramah lingkungan dan hemat energi.
2. Bagi industri agar dapat mengetahui bentuk komponen baru dari pendingin yang tidak terdapat pada pendingin sistem kompresi uap yaitu adsorber dan cara kerjanya.
3. Bagi perguruan tinggi agar dapat mengembangkan penelitian sistem pendingin adsorpsi dengan pasangan adsorben-adsorbate dari karbon aktif-

metanol sehingga menghasilkan COP yang lebih tinggi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Pengertian Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses dimana molekul-molekul fluida menyentuh dan melekat pada permukaan padatan (Nasruddin, 2005). Adsorpsi adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair dikontakkan dengan suatu permukaan padatan dan sebagian dari molekul-molekul tadi mengembun pada permukaan padatan tersebut.



Gambar 1. Adsorpsi dan desorpsi (<http://joejaworski.files.wordpress.com>, 2014)

Padatan berpori yang menghisap (*adsorption*) dan melepaskan (*desorption*) suatu fluida disebut adsorben. Molekul fluida yang dihisap tetapi tidak terakumulasi/melekat ke permukaan adsorben disebut *adsorptive*, sedangkan yang terakumulasi/melekat disebut *adsorbat*.

2.2 Adsorben dan Adsorbat

Adsorben memiliki pasangan masing-masing, pada umumnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

- a. Polar adsorben atau *Hydrophilic*, meliputi silica gel, zeolit, *active alumina*. Dengan air sebagai adsorbatnya.
- b. Non-polar adsorben atau *Hydrophobic*, meliputi karbon aktif dan adsorben polimer. Dengan oli atau gas sebagai adsorbatnya.

2.1.1 Adsorben

Luasnya permukaan spesifik, sangat mempengaruhi besarnya kapasitas penyerapan dari adsorben. Semakin luas permukaan spesifik dari adsorben, maka semakin besar pula kemampuan penyerapannya. Volume adsorben membatasi jumlah dan ukuran pori-pori pembentuk permukaan dalam (*internal surface*) yang menentukan besar atau kecilnya permukaan penyerapan spesifik. Macam-macam adsorben yang umum digunakan, antara lain :

a. Silika gel

Silika gel cenderung mengikat adsorbat dengan energi yang relatif kecil dan membutuhkan temperatur yang rendah untuk proses desorpsinya, dibandingkan jika menggunakan adsorben lain seperti karbon atau zeolit. Kemampuan desorpsi silika gel meningkat dengan meningkatnya temperatur. Silika gel terbuat dari silika gel dengan ikatan kimia mengandung air kurang lebih 5%. Pada umumnya temperatur kerja silika gel sampai 200°C, jika dioperasikan lebih dari batas temperatur kerjanya maka kandungan air dalam silika gel akan hilang dan menyebabkan kemampuan adsorpsinya hilang.



Gambar 2. Silika Gel

(<http://silicagelproducts.blogspot.com>, 2014)

b. Karbon Aktif

Karbon aktif dapat dibuat dari batu bara, kayu, dan tempurung kelapa meliputi proses *pyrolizing* dan *carburizing* pada temperatur 700 sampai 800°C. Hampir

semua adsorbat dapat diserap oleh karbon aktif kecuali air. Karbon aktif dapat ditemukan dalam bentuk bubuk dan *granular*. Pada umumnya karbon aktif dapat mengadsorpsi metanol atau amonia sampai dengan 30%, bahkan karbon aktif super dapat mengadsorpsi sampai dua kalinya.

c. Zeolit

Zeolit mengandung kristal zeolit yaitu mineral *aluminosilicate* yang disebut sebagai penyaring molekul. Mineral *aluminosilicate* ini terbentuk secara alami. Zeolit buatan dibuat dan dikembangkan untuk tujuan khusus, diantaranya 4A, 5A, 10X, dan 13X yang memiliki volume rongga antara 0.05 sampai 0.30 cm³/gram dan dapat dipanaskan sampai 500°C tanpa harus kehilangan mampu adsorpsi dan regenerasinya. Zeolit 4A (NaA) digunakan untuk mengeringkan dan memisahkan campuran *hydrocarbon*. Zeolit 5A (CaA) digunakan untuk memisahkan *paraffins* dan beberapa *Cyclic hydrocarbon*. Zeolit 10X (CaX) dan 13X (NaX) memiliki diameter pori yang lebih besar sehingga dapat mengadsorpsi adsorbat pada umumnya.



Gambar 3. Zeolit

(<http://www.buyagreenhouse.com/>, 2014)

2.1.2 Adsorbat

Adsorbat merupakan substansi yang mampu untuk menempel/melekat atau diadsorpsi pada permukaan adsorben. Jumlah adsorbat yang diadsorpsi tergantung pada beberapa faktor diantaranya jenis adsorben, jenis adsorbat, konsentrasi adsorbat dan temperatur. Adsorbat pada sistem refrigerasi adsorpsi merupakan pengganti refrigeran seperti pada pendingin kompresi uap. Adsorbat yang digunakan harus memiliki kalor laten penguapan yang tinggi yang digunakan untuk mengukur

energi pendinginan. Adsorbat yang biasa digunakan untuk pendinginan adsorpsi adalah air, metanol dan amonia.

a. Air

Air merupakan refrigeran yang ideal karena memiliki kalor laten spesifik yang tinggi dan tidak beracun. Air dapat digunakan sebagai pasangan zeolit dan silika gel, tapi tekanan penguapan yang rendah merupakan keterbatasan air sebagai refrigeran.

b. Metanol

Metanol memiliki tekanan penguapan yang tinggi dibanding dengan air, metanol dapat dengan mudah terevaporasi pada temperatur di bawah 0°C karena metanol bekerja dibawah tekanan atmosfer sehingga sangat cocok digunakan untuk pembuatan es, metanol sebagai refrigeran/adsorbat sebagai pasangan adsorben yang terbuat dari karbon aktif, silika gel dan zeolit dengan pemanasan hingga 120°C.

c. Amonia

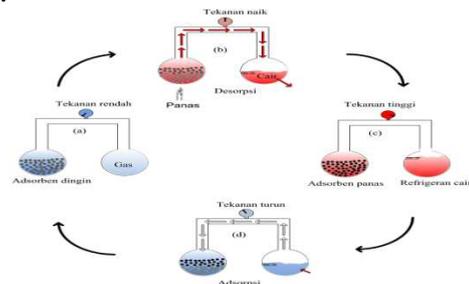
Besarnya panas laten spesifik amonia adalah setengah lebih rendah dari panas laten spesifik air, pada temperatur 0°C dan memiliki tekanan penguapan yang tinggi. Amonia memiliki keuntungan yang ramah lingkungan dan dapat digunakan sebagai refrigeran sampai -40°C, dan dapat dipanaskan sampai 200°C. Amonia memiliki beberapa kerugian sebagai berikut :

- beracun, sehingga penggunaannya dibatasi
- tidak dapat ditampung pada instalasi yang terbuat dari tembaga atau campurannya.

2.3 Prinsip Sistem Pendingin Adsorpsi

Siklus pendingin adsorpsi berlangsung dengan penyerapan refrigeran/adsorbat dalam fasa uap kedalam adsorben pada tekanan rendah, kemudian refrigeran yang terserap pada adsorben didesorpsi dengan memberikan panas pada adsorben (Ambarita, 2008). Bentuk sederhana dari siklus pendingin adsorpsi seperti dua botol labu

yang berhubungan seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 4. Siklus Dasar Refrigerasi Adsorpsi (Nasruddin, 2005)

Pada awalnya sistem dikondisikan pada tekanan dan temperatur rendah. Dua buah botol labu (vessel) yang berhubungan, dimana pada labu pertama terdapat adsorben (karbon aktif) yang mengandung adsorbat berkonsentrasi tinggi sedangkan pada labu yang kedua terdapat adsorbat dalam fasa uap (Gambar 2.5a).

Labu pertama yang berisi adsorben dengan kandungan adsorbat berkonsentrasi tinggi dipanaskan, sehingga tekanan sistim meningkat dan menyebabkan kandungan adsorbat yang ada di dalam adsorben berkurang atau menguap. Proses berkurangnya kandungan adsorbat pada adsorben pada kasus ini disebut desorpsi.

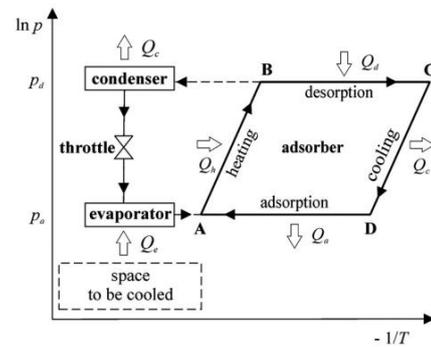
Adsorbat yang menguap kemudian terkondensasi dan mengalir ke botol labu yang kedua, disini panas dilepaskan ke lingkungan dimana tekanan sistim masih tinggi. Pemanasan pada botol labu pertama dihentikan, lalu pada botol labu yang pertama terjadi perpindahan panas ke lingkungan sehingga tekanan sistim menjadi rendah. Tekanan sistim yang rendah menyebabkan adsorbat cair pada botol labu yang kedua menguap dan terserap ke botol pertama yang berisi adsorben. Proses terserapnya adsorbat ke adsorben pada kasus ini disebut adsorpsi. Proses adsorpsi menghasilkan efek pendinginan yang terjadi pada botol labu kedua, dimana pada tekanan rendah panas dari lingkungan diserap untuk menguapkan adsorbat (Gambar 2.5b) sampai sistim kembali ke kondisi awal dimana pada botol labu pertama berisi adsorben dengan

kandungan adsorbat berkonsentrasi tinggi dan pada botol labu kedua terdapat adsorbat dalam fasa gas. (Gambar 2.5c).

2.4 Siklus Ideal Sistem Pendingin Adsorpsi

Adsorpsi dan desorpsi merupakan suatu proses yang dapat berlangsung secara reversibel. Adsorpsi merupakan proses *exothermic* dimana adsorben (fluida) dan adsorbat (padatan) melepaskan panas sehingga menyebabkan penurunan pergerakan molekul adsorbat yang mengakibatkan adsorbat tersebut menempel pada permukaan adsorben dan membentuk suatu lapisan tipis. Ketika panas diberikan kepada sistem tersebut maka pergerakan molekul adsorbat akan meningkat sehingga pada jumlah panas tertentu akan menghasilkan energi kinetik molekul adsorbat yang cukup untuk merusak gaya van der Waals antara adsorben dan adsorbat. Proses pelepasan adsorbat dari adsorben disebut sebagai proses desorpsi, dimana proses ini membutuhkan energi panas sehingga disebut proses *endothermic*.

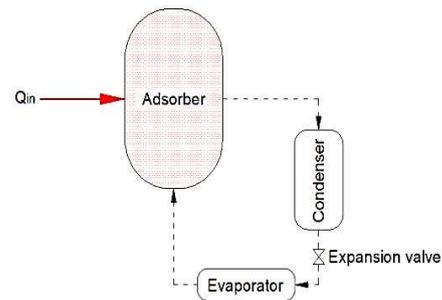
Siklus mesin pendingin adsorpsi tidak membutuhkan energi mekanis, melainkan membutuhkan energi panas. Pada saat mesin pendingin beroperasi, beberapa proses yang terjadi pada adsorber yang melibatkan proses *endothermic* dan *exothermic*. Proses *endothermic* berlangsung selama proses pemanasan (peningkatan tekanan) dan proses pemanasan - desorpsi-kondensasi, sedangkan proses *exothermic* berlangsung selama proses pendinginan (penurunan tekanan) dan proses pendinginan - adsorpsi - evaporasi. Keempat proses tersebut membentuk suatu siklus yang digambarkan oleh diagram Clapeyron ideal seperti pada gambar 2.6.



Gambar 5. Diagram Clapeyron Ideal (Wang, et al, 2009)

Keempat proses yang terjadi dapat diuraikan sebagai berikut ini :

1. Proses Pemanasan (pemberian tekanan)
Proses pemanasan dimulai dari titik 3 dimana adsorben berada pada temperatur rendah T_3 dan tekanan rendah P_{evap} (tekanan evaporator). Selama periode ini, tidak ada aliran metanol yang masuk maupun keluar dari adsorber. Adsorber menerima panas sehingga temperatur adsorber meningkat dan diikuti oleh peningkatan tekanan dari tekanan evaporasi menjadi tekanan kondensasi. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.7. (Ponsw, 2008)

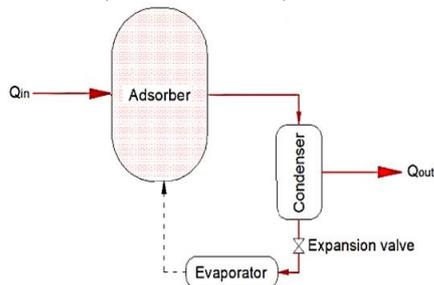


Gambar 6. Proses Pemanasan (Ponsw, 2008)

2. Proses Pemanasan - Desorpsi - Kondensasi

Proses desorpsi berlangsung pada waktu panas diberikan dari titik 4 ke 5. Selama periode ini, adsorber terus dialiri panas sehingga adsorber terus mengalami peningkatan dan temperatur yang menyebabkan timbulnya uap desorpsi. Sementara itu, katup aliran ke kondensor dibuka sehingga adsorbat dalam bentuk gas mengalir ke kondensor untuk

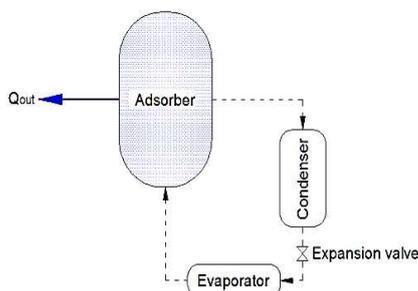
mengalami proses kondensasi menjadi cair. Kalor laten penguapan adsorbat diserap oleh media pendingin pada kondensor. Siklus ini sama dengan siklus kondensasi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.8. (Ponsw, 2008)



Gambar 7. Proses Pemanasan-Desorpsi-Kondensasi (Ponsw, 2008)

3. Proses Pendinginan (penurunan tekanan)

Proses pendinginan berlangsung dari titik 5 ke 6. Selama periode ini, tidak ada aliran metanol yang masuk maupun keluar dari adsorber. Adsorber melepaskan panas dengan cara didinginkan sehingga temperatur di adsorber turun dan diikuti oleh penurunan tekanan dari tekanan kondensasi ke tekanan evaporasi, proses ini sama seperti proses ekspansi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini ditunjukkan pada gambar 2.9. (Ponsw, 2008)

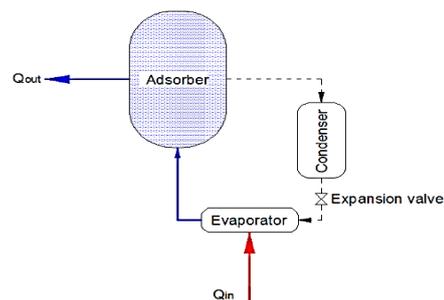


Gambar 8. Proses Pendinginan (Ponsw, 2008)

4. Proses Pendinginan-Adsorpsi-Evaporasi

Proses adsorpsi berlangsung dari titik 6 ke 3. Adsorber terus melepaskan panas sehingga adsorber mengalami penurunan temperatur dan tekanan yang menyebabkan timbulnya uap

adsorpsi. Selama periode ini, adsorber terus melepaskan panas sehingga adsorber terus mengalami penurunan temperatur dan tekanan yang menyebabkan timbulnya uap adsorpsi. Sementara itu, katup aliran dari evaporator ke adsorber dibuka sehingga adsorbat dalam bentuk uap mengalir dari evaporator ke adsorber. Adsorbat dalam bentuk uap dihasilkan dari proses penyerapan kalor oleh adsorbat dari lingkungan sebesar kalor laten penguapan adsorbat tersebut. Proses ini berlangsung pada tekanan saturasi yang rendah sehingga penyerapan kalor berlangsung pada temperatur saturasi yang rendah pula. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.10. (Ponsw, 2008)



Gambar 9. Proses Pendinginan-Adsorpsi-Evaporasi (Ponsw, 2008)

2.5 Perhitungan COP

COP (*Coefficient of Performance*) adalah nilai yang menunjukkan performansi dari suatu mesin, biasanya dipakai dalam suatu sistem pendingin. Pada sistem pendingin adsorpsi dilakukan perhitungan juga terhadap nilai COP.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{heater}} \quad (2.1)$$

$$Q_{evap} = \frac{m_{adsorbate} \times (h_{sat, methanol vapor} - h_{sat, methanol liquid})}{\Delta t_{ads}} \quad (2.2)$$

$$Q_{waste heat} = \frac{m_{adsorbent} \times \left[\left(c_{p, sorbent} + c_{p, liquid adsorbate} \frac{m_{bed}}{m_{sorbent}} \right) \Delta h \right]}{\Delta t} \quad (2.3)$$

3. Metodologi

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimen dengan melakukan pengambilan data tekanan dan temperatur. Pengambilan data temperatur dilakukan secara otomatis melalui data akuisisi yang terhubung ke komputer, sedangkan untuk data tekanan diambil secara manual melalui pembacaan vacuum gauge.

3.2 Alat dan Bahan

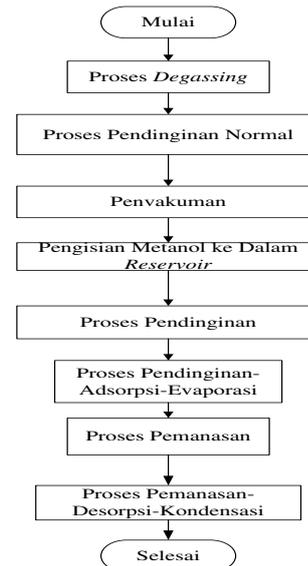
Sebelum melakukan pengujian pada alat pendingin adsorpsi ini, perlu disiapkan beberapa peralatan pendukung dan bahan yang digunakan, yaitu :

1. *Heater*
2. Pompa aquarium
3. Pompa sentrifugal
4. Pompa vakum
5. *Flowmeter*
6. *Temperature Controller*
7. Kompresor
8. Metanol dengan kadar kemurnian 98%
9. Karbon Aktif

Dan adapun beberapa alat ukur yang diperlukan pada pengujian sistem pendingin adsorpsi ini, yaitu :

1. *Vacuum Gauge*
Digunakan untuk mengukur tekanan vakum yang dilakukan selama proses awal pengujian dalam pengambilan data.
2. Termokopel
Termokopel yang digunakan adalah tipe K. Termokopel yang digunakan berfungsi untuk mengukur temperatur metanol dan air pada masing-masing komponen.
3. Data Akuisisi
Data akuisisi berfungsi untuk menghubungkan termokopel yang dipasang pada sistem pendingin adsorpsi dengan komputer sehingga data dapat tercatat secara otomatis.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

3.4 Pengambilan Data

Data yang diambil berupa data kuantitatif pada beberapa titik di setiap komponen yang terukur oleh alat ukur selama waktu pengujian. Jeda waktu pengambilan data dilakukan setiap menitnya dengan mencatat ukuran awal yang terbaca di alat ukur sebelum memulai proses.

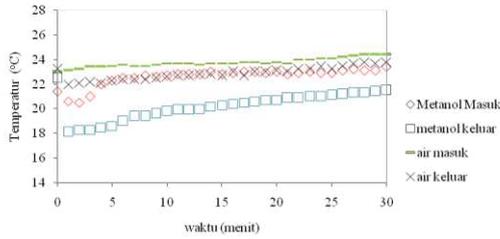
Pengambilan data dilakukan dengan 2 cara yaitu secara otomatis melalui komputer yang membaca intup data dari data akuisisi dan manual untuk pembacaan tekanan pada evaporator, kondensor, adsorber, dan *reservoir*.

4. Hasil

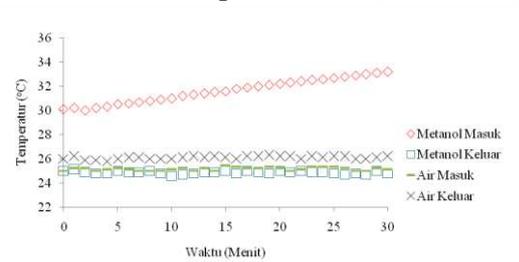
4.1 Hasil dan Pembahasan Tekanan dan Temperatur

Hasil yang diperoleh pada pengujian ini berupa grafik-grafik yang menunjukkan hubungan antara waktu dengan temperatur metanol masuk, metanol keluar, temperatur air masuk dan air keluar, tekanan adsorber, dan tekanan metanol masuk dan keluar. Pengujian Variasi Waktu Desorpsi 30 Menit

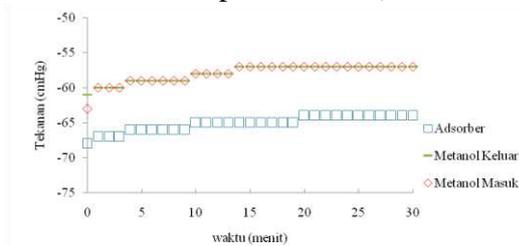
- a. Pengujian Variasi Waktu Desorpsi 30 Menit



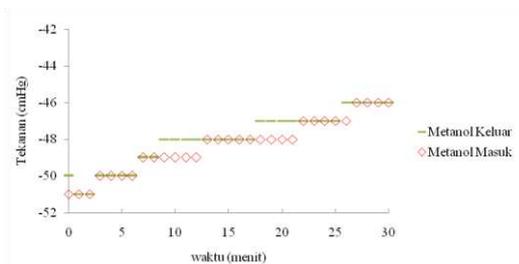
Gambar 11. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Adsorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 30 Menit)



Gambar 12. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 30 Menit)



Gambar 13. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Adsorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 30 Menit)



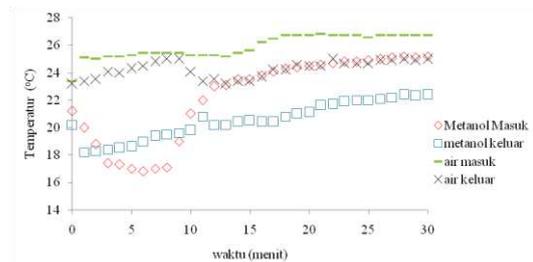
Gambar 14. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 30 menit)

Berdasarkan data yang diperoleh dapat dilihat bahwa pada saat proses adsorpsi temperatur terendah metanol masuk adalah $20,5^{\circ}\text{C}$, temperatur air keluar terendah adalah 22°C dapat dilihat pada Gambar 11.

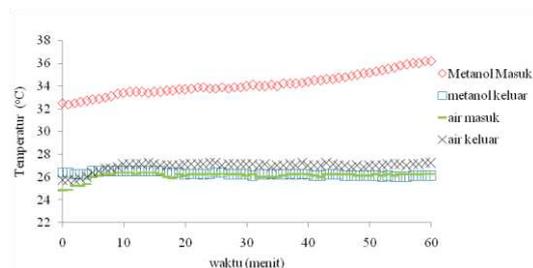
Temperatur metanol keluar turun secara cepat pada menit pertama menjadi $18,1^{\circ}\text{C}$, hal ini disebabkan karena temperatur metanol keluar dipengaruhi juga oleh tekanan adsorber yang rendah pada menit pertama yaitu -67cmHg . Tekanan adsorber terus naik secara konstan dan mencapai kondisi setimbang pada tekanan -64cmHg pada menit ke 30 dan tekanan metanol masuk dan keluar mencapai kondisi setimbang pada tekanan -57cmHg dapat dilihat pada Gambar 13.

Pada saat proses desorpsi temperatur tertinggi metanol adalah $35,4^{\circ}\text{C}$ dan temperatur air keluar tertinggi adalah $26,3^{\circ}\text{C}$ dapat dilihat pada Gambar 12. Tekanan metanol masuk pada awalnya adalah -51cmHg dan tekanan metanol keluar pada awalnya adalah -50cmHg , kemudian mengalami kenaikan yang cukup konstan hingga mencapai tekanan untuk metanol yang masuk dan keluar tertinggi yaitu -46cmHg , dapat dilihat pada Gambar 14.

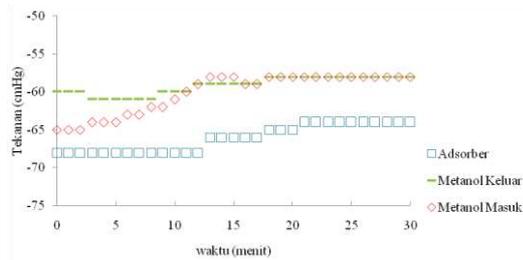
b. Pengujian Variasi Waktu Desorpsi 60 menit



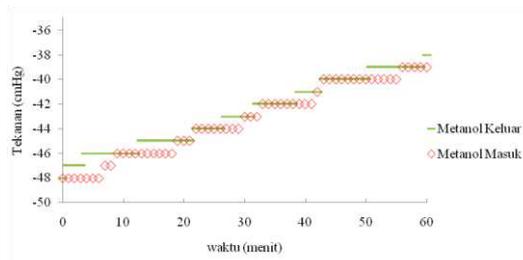
Gambar 15. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Adsorpsi Variasi Waktu Desorpsi 60 Menit)



Gambar 16. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 60 Menit)



Gambar 17. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Adsorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 60 Menit)



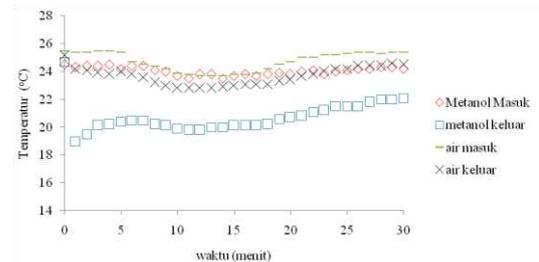
Gambar 18. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 60 Menit)

Berdasarkan data yang diperoleh pada saat variasi proses waktu desorpsi 60 menit, pada saat proses adsorpsi dapat dilihat bahwa temperatur terendah metanol masuk adalah $16,8^{\circ}\text{C}$, temperatur metanol keluar terendah adalah $18,2^{\circ}\text{C}$ dan temperatur terendah air yang keluar adalah $23,2^{\circ}\text{C}$ dapat dilihat pada Gambar 15. Pada pengujian ini dapat dilihat bahwa temperatur metanol masuk pada 6 menit pertama mengalami penurunan temperatur yang cukup jauh, hal ini disebabkan karena pada saat kondisi penvakuman sebelum sistem dijalankan, tekanan pada reservoir mampu mencapai -68cmHg , sedangkan pada pengujian waktu desorpsi 30 menit hanya mampu mencapai tekanan -65cmHg , dan pada saat pengujian waktu desorpsi 90 menit tekanan hanya mampu mencapai -63cmHg . Tekanan adsorber pada awalnya adalah -68cmHg , tekanan metanol masuk pada awalnya adalah -64cmHg , tekanan metanol keluar pada awalnya adalah -60cmHg . Kemudian tekanan adsorber mencapai kondisi setimbang pada tekanan -64cmHg dan tekanan metanol masuk dan

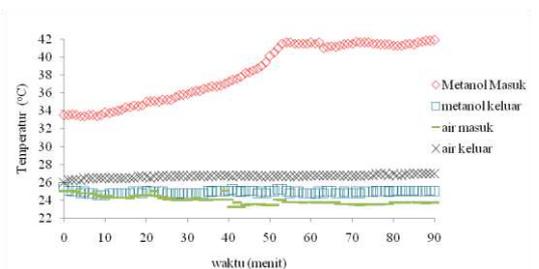
keluar mencapai kondisi setimbang pada tekanan -58cmHg , dapat dilihat pada Gambar 17.

Pada proses desorpsi temperatur metanol tertinggi adalah $35,4^{\circ}\text{C}$ dan temperatur air keluar tertinggi $27,2^{\circ}\text{C}$ dapat dilihat pada Gambar 16. Tekanan metanol masuk pada awal proses desorpsi adalah -48cmHg dan tekanan metanol keluar adalah -48cmHg juga. Selama 1 jam waktu desorpsi tekanan masuk seimbang pada tekanan -39cmHg , dan tekanan keluar mencapai -38cmHg .

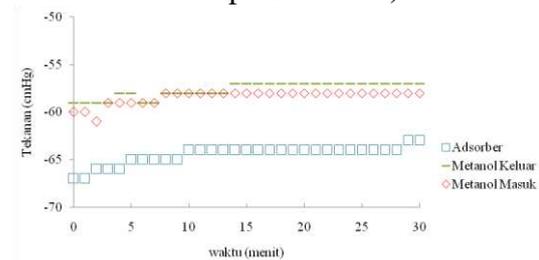
c. Pengujian Variasi Waktu Desorpsi 90 menit



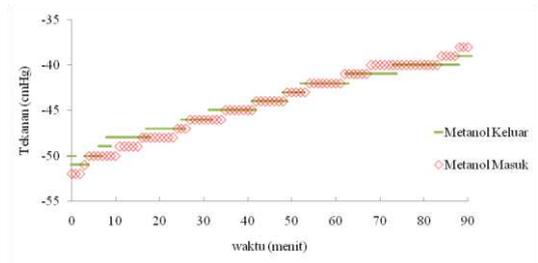
Gambar 19. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Adsorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 90 Menit)



Gambar 20. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 90 Menit)



Gambar 21. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Adsorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 90 Menit)

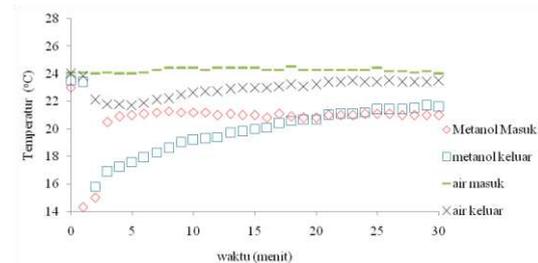


Gambar 22. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Desorpsi (Variasi Waktu Desorpsi 90 Menit)

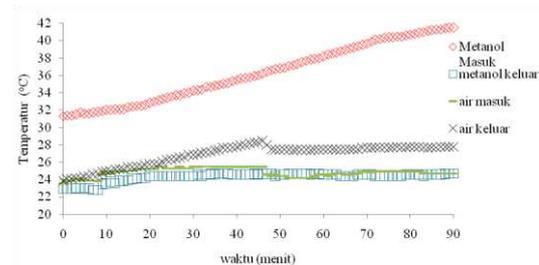
Berdasarkan data yang telah didapat pada saat pengujian variasi waktu desorpsi 90 menit, didapatkan temperatur metanol masuk yang terendah adalah 23,5°C, temperatur metanol keluar terendah adalah 19°C dan temperatur air keluar yang terendah adalah 22,8°C. Dapat dilihat bahwa temperatur metanol pada menit pertama mengalami penurunan yang cukup jauh juga dari 24,7°C menjadi 19°C, hal ini karena dipengaruhi oleh tekanan vakum dari adsorber sehingga menurunkan tekanan pada evaporator. Pada tekanan metanol masuk dapat dilihat bahwa mencapai kesetimbangan pada tekanan -58cmHg, pada tekanan metanol keluar dapat mencapai kesetimbangan pada tekanan -57cmHg, sedangkan pada adsorber tekanan naik paling tinggi mencapai tekanan -63cmHg. Dapat dilihat pada Gambar 19 dan Gambar 21.

Pada proses desorpsi temperatur metanol tertinggi dapat mencapai 41,9°C, temperatur air tertinggi dapat mencapai temperatur 26,2°C. Tekanan metanol pada awalnya adalah -52cmHg kemudian selama proses desorpsi 90 menit, tekanan naik menjadi -38cmHg. Pada tekanan metanol keluar tekanan pada awalnya adalah -50cmHg kemudian selama proses desorpsi 90 menit tekanan naik menjadi -39cmHg. Dapat dilihat pada Gambar 20 dan Gambar 22.

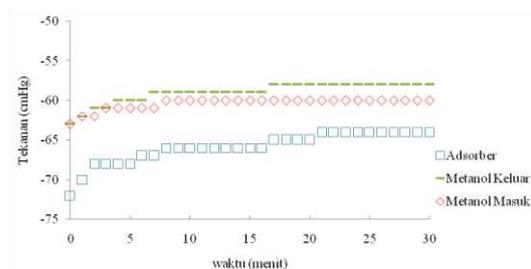
d. Pengujian Variasi Laju Aliran Massa 0,016 kg/s



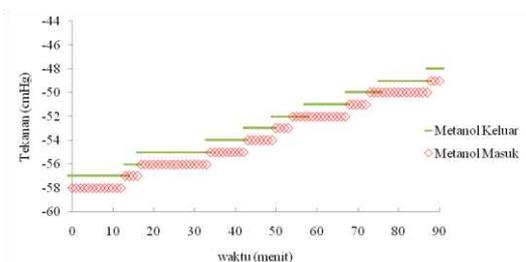
Gambar 23. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Adsorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,016kg/s)



Gambar 24. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Desorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,016kg/s)



Gambar 25. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Adsorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,016kg/s)



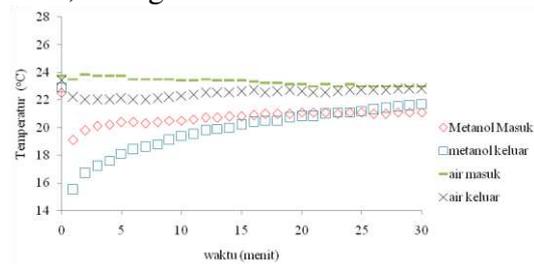
Gambar 26. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Desorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,016kg/s)

Berdasarkan data pengujian yang didapatkan, dapat dilihat bahwa dengan laju aliran massa air pada evaporator 0,016

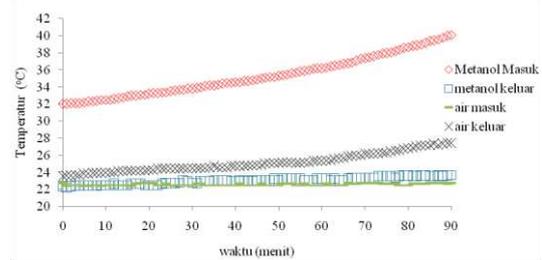
kg/s pada saat proses adsorpsi temperatur terendah metanol yang masuk adalah 14,3°C, temperatur terendah metanol yang keluar adalah 15,8°C, dan temperatur air keluar yang terendah adalah 21,7°C. Temperatur metanol yang masuk mengalami kenaikan temperatur yang cukup tinggi dari menit 3 ke menit 4, hal ini disebabkan karena pada saat memasuki menit ke-4 temperatur metanol yang masuk sudah mengalami kesetimbangan temperatur. Sedangkan pada temperatur metanol keluar mengalami kenaikan temperatur sedikit demi sedikit mulai dari menit ke-3 sampai proses adsorpsi selesai. Kenaikan temperatur metanol keluar tidak langsung naik drastis seperti pada metanol masuk hal ini dikarenakan pada bagian evaporator *output* masih besar dipengaruhi oleh kondisi tekanan adsorber yang masih rendah. Tekanan metanol masuk dan metanol keluar pada awalnya -63 cmHg, kemudian pada tekanan metanol masuk mengalami kenaikan mencapai tekanan -60 cmHg, sedangkan pada metanol keluar mengalami kenaikan mencapai tekanan -58 cmHg. Tekanan pada adsorber awalnya -72 cmHg, kemudian mengalami kenaikan tekanan mencapai -64 cmHg. Dapat dilihat pada Gambar 23 dan Gambar 25.

Pada proses desorpsi, temperatur metanol masuk tertinggi adalah 41,5°C. Temperatur air keluar tertinggi adalah 28,4°C. Temperatur metanol masuk dan temperatur air keluar naik secara perlahan seiring dengan kenaikan temperatur metanol masuk ke kondensor. Temperatur air mengalami penurunan pada menit ke-47 karena nilai temperatur air yang masuk lebih rendah, dimana air masuk berasal dari sumur bor dengan faktor alam mengalami penurunan temperatur. Tekanan pada metanol masuk juga terus mengalami kenaikan karena adanya panas yang diberikan pada adsorber selama proses desorpsi, sehingga tekanan tertinggi masuk ke kondensor pada saat proses desorpsi adalah -49 cmHg. Dapat dilihat pada Gambar 24 dan Gambar 26.

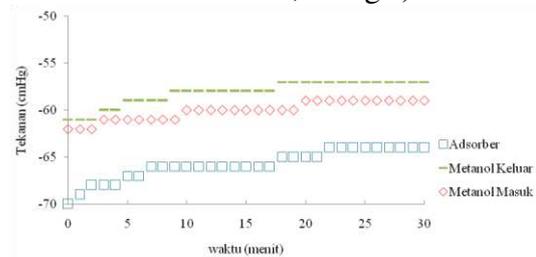
e. Pengujian Variasi Laju Aliran Massa 0,023 kg/s



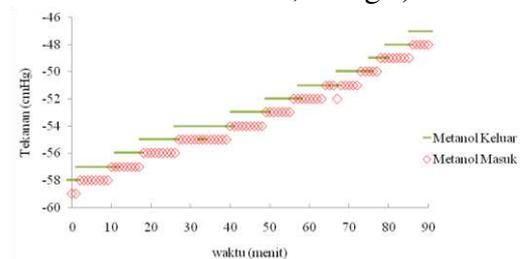
Gambar 27. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Adsorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,023kg/s)



Gambar 28. Grafik Waktu vs Temperatur pada Proses Desorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,023kg/s)



Gambar 29. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Adsorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,023kg/s)



Gambar 30. Grafik Waktu vs Tekanan pada Proses Desorpsi (Variasi Laju Aliran Massa Air 0,023kg/s)

Berdasarkan data pengujian yang dilakukan dengan variasi laju aliran massa air 0,023 kg/s, pada saat proses adsorpsi didapatkan temperatur terendah metanol masuk adalah 19,1°C, temperatur terendah metanol keluar 15,5°C, dan temperatur air keluar terendah adalah 22°C. Tekanan

metanol masuk pada awalnya adalah -62 cmHg kemudian mengalami kenaikan mencapai -59 cmHg. Tekanan metanol keluar pada awalnya -61 cmHg kemudian mengalami kenaikan mencapai -57 cmHg. Dan tekanan adsorber pada awalnya adalah -70 cmHg kemudian mengalami kenaikan mencapai -64 cmHg. Dapat dilihat pada Gambar 27 dan 29.

Pada saat proses desorpsi temperatur metanol masuk tertinggi adalah 40,1°C. Temperatur air keluar tertinggi adalah 27,4°C. Tekanan metanol masuk pada awalnya adalah -59 cmHg kemudian selama proses desorpsi berlangsung selama 90 menit naik menjadi -48 cmHg. Sedangkan pada tekanan metanol keluar pada awalnya adalah -58 cmHg kemudian naik menjadi -47 cmHg.

4.2 Hasil dan Pembahasan COP

Untuk menghitung nilai Q_{evap} yang diperlukan, perlu diketahui terlebih dahulu beberapa data. Data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

- Massa adsorbat yang digunakan = 2L
- Waktu adsorpsi = 30 menit
- Δh (diperoleh dari data pengujian yang diolah dengan bantuan *software refrop*)

Untuk menghitung nilai $Q_{waste\ heat}$ yang diperlukan perlu diketahui terlebih dahulu beberapa data, dapat dilihat pada persamaan (2.3). Data yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

- Massa adsorben yang digunakan = 6,5 kg
- C_p adsorben = 1,13 kJ/kg°C
- C_p adsorbate liquid diperoleh dari data tekanan yang kemudian dirata-ratakan dan diolah dengan bantuan *software refrop* untuk mendapatkan nilai C_p .
- Massa bed = 44 kg
- $C_p\ bed$ = 0,49 kJ/kg°C
- Δh (diperoleh dari data pengujian yang diolah dengan bantuan *software refrop*)

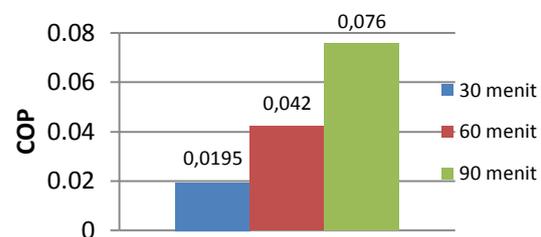
- ΔT diperoleh dari beda temperatur metanol
 - Δt variasi waktu yang dilakukan
- a. Perbandingan Nilai COP dengan Variasi Waktu Desorpsi

Tabel 1 Data dan Nilai Q_{evap} dengan Variasi Waktu Desorpsi

Waktu Pengujian (menit)	Temp Metanol masuk rata-rata (°C)	Temp Metanol Keluar rata-rata (°C)	h metanol masuk (kJ/kg)	h metanol keluar (kJ/kg)	Massa Terdesorpsi (kg)	Q_{evap} (kW)
30	22,6	20,2	-111,64	1058,6	0,51467	0,334904123
60	22,2	20,5	-112,65	1058,9	0,55406	0,360746279
90	24	20,7	-108,11	1059,1	0,67303	0,436426304

Tabel 2 Data dan Nilai $Q_{waste\ heat}$ dengan Variasi Waktu Desorpsi

Waktu Pengujian (menit)	Temp Metanol masuk rata-rata (°C)	Temp Metanol Keluar rata-rata (°C)	h metanol masuk (kJ/kg)	h metanol keluar (kJ/kg)	Massa Adsorben (kg)	$Q_{waste\ heat}$ (kW)
30	31,6	24,9	1070	-105,83	6,5	17,19431673
60	34,1	26,3	1072,5	-102,27	6,5	8,589146579
90	38,2	24,9	1076,5	-105,83	6,5	5,762485473



Gambar 31. Perbandingan Nilai COP dengan Variasi Waktu Desorpsi

Berdasarkan Tabel 1 data yang didapat menunjukkan bahwa nilai Q_{evap} pada pengujian waktu desorpsi 90 menit lebih besar dibandingkan dengan Q_{evap} pada pengujian waktu desorpsi 30 menit dan 60 menit. Pada pengujian waktu desorpsi 90 menit, massa metanol yang terserap ke dalam karbon aktif lebih besar sehingga nilai Q_{evap} yang diperoleh lebih besar.

Dari Tabel 2 $Q_{waste\ heat}$ pada pengujian waktu desorpsi 90 menit merupakan nilai Q yang paling rendah. Hal ini terjadi karena nilai temperatur rata-rata metanol yang masuk lebih tinggi sehingga ΔT metanol lebih tinggi, semakin tinggi nilai ΔT metanol akan membuat nilai $Q_{waste\ heat}$ akan rendah sehingga COP sistem pada pengujian variasi waktu desorpsi 90 menit bisa lebih tinggi.

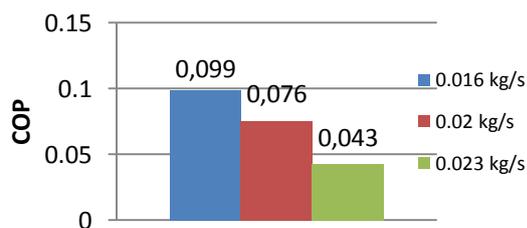
b. Perbandingan Nilai COP dengan Variasi Laju Aliran Massa

Tabel 3 Data dan Nilai Q evap dengan Variasi Laju Aliran Massa

Laju Aliran Massa Air (kg/s)	Temp Metanol masuk rata-rata (°C)	Temp Metanol Keluar rata-rata (°C)	h metanol masuk (kJ/kg)	h metanol keluar (kJ/kg)	Massa Teradsorpsi (kg)	Q evap (kW)
0,016	20,7	20	-116,42	1058,4	0,8701	0,567894934
0,02	24	20,7	-108,11	1059,1	0,67303	0,436426304
0,023	20,8	19,9	-116,17	1058,3	0,37215	0,242821673

Tabel 4 Data dan Nilai Q waste heat dengan Variasi Laju Aliran Massa

Laju Aliran Massa Air (kg/s)	Temp Metanol masuk rata-rata (°C)	Temp Metanol Keluar rata-rata (°C)	h metanol masuk (kJ/kg)	h metanol keluar (kJ/kg)	Massa Adsorben (kg)	Q waste heat (kW)
0,016	36,3	24,3	1074,6	-107,35	6,5	5,760697833
0,02	38,2	24,9	1076,5	-105,83	6,5	5,762485473
0,023	35,3	23	1073,6	-97,172	6,5	5,706207077



Gambar 32. Perbandingan Nilai COP dengan Variasi Laju Aliran Massa

Untuk nilai laju aliran massa 0,02kg/s, datanya sama dengan data pada pengujian variasi waktu desorpsi 90 menit. Karena pada variasi laju aliran massa waktu desorpsi yang digunakan untuk semua pengujian adalah 90 menit, sehingga data untuk laju aliran massa 0,02 kg/s sama dengan pengujian waktu desorpsi 90 menit. Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa massa yang teradsorpsi pada pengujian variasi laju aliran massa 0,016 kg/s lebih tinggi dibanding pengujian lainnya yaitu 0,8701 kg yang terserap dalam karbon aktif. Berdasarkan data $Q_{\text{waste heat}}$ pada Tabel 4 nilai Q yang diperoleh relatif sama karena waktu desorpsi yang digunakan sama sehingga temperatur rata-rata metanol masuk juga hampir sama karena temperatur desorpsi yang sama yaitu 90°C.

Dari semua pengujian yang telah dilakukan, baik dengan variasi waktu desorpsi dan variasi laju aliran massa dapat dilihat bahwa COP pada sistem pendingin adsorpsi ini masih rendah. Adapun beberapa faktor yang menyebabkan masih

kecilnya COP yang didapatkan pada sistem pendingin adsorpsi ini dengan pasangan karbon aktif-metanol sebagai adsorben-adsorbat, yaitu :

1. Temperatur *Degassing* dan Temperatur Desorpsi

Temperatur *degassing* yang kurang tinggi sehingga zat-zat yang masih terserap dalam karbon aktif belum terlepas sepenuhnya. Hal ini akan berpengaruh terhadap proses penvakuman sistem, apabila proses *degassing* tidak mengeluarkan zat-zat yang tidak diperlukan maka proses penvakuman akan menjadi sulit untuk mencapai tekanan mendekati -76cmHg. Sehingga temperatur adsorpsi yang diperoleh masih tinggi dan menyebabkan metanol yang berfungsi sebagai refrigeran tidak mampu mencapai temperatur yang rendah saat masuk ke dalam evaporator akibatnya air yang berada di dalam evaporator tidak dapat terserap kalor secara sepenuhnya sehingga ΔT air yang diperoleh rendah. Begitu juga dengan temperatur desorpsi, semakin tinggi temperatur desorpsi maka metanol yang terserap pada karbon aktif akan lebih cepat terdesorpsi dan jumlah metanol yang terdesorpsi bisa lebih banyak sehingga untuk proses selanjutnya tekanan sistem bisa menjadi lebih rendah karena metanol dapat terdesorpsi sepenuhnya .

2. Media Fluida Pada Saat Proses *Pre-heating* dan *Desorpsi*

Media fluida yang digunakan pada pengujian ini adalah air. Pada pengujian ini temperatur desorpsi dan *pre-heating* dijaga pada temperatur 90°C. Semakin tinggi temperatur yang disirkulasikan akan semakin bagus untuk proses desorpsi, sehingga semua metanol yang terserap dapat terdesorpsi semuanya. Jika menggunakan media air, temperatur tertinggi yang dapat dikontrol hanya pada temperatur 90°C karena air sudah mulai menguap, jadi temperatur tidak dapat dinaikkan. Semakin meningkatnya temperatur pada saat proses desorpsi, maka nilai ΔT yang diperoleh akan semakin besar

sehingga COP yang diperoleh dari sistem semakin tinggi.

5. Simpulan

1. Berdasarkan pengujian terhadap variasi waktu desorpsi, variasi waktu desorpsi 90 menit memiliki COP tertinggi yaitu 0,076.
2. Berdasarkan pengujian terhadap variasi laju aliran massa air pada evaporator, COP tertinggi berada pada variasi laju aliran massa air 0,016 kg/s yaitu 0,098.
3. Semakin rendah nilai laju aliran massa air pada evaporator dan semakin lama proses desorpsi pada sistem pendingin adsorpsi pasangan karbon aktif-metanol sebagai adsorben-adsorbat maka COP pada sistem akan semakin meningkat.
4. Lamanya waktu adsorpsi yang ideal pada sistem pendingin adsorpsi yang uji ini adalah 15 menit-20 menit, hal ini bisa dilihat dari kesetimbangan tekanan yang sudah terjadi pada data yang diperoleh ketika memasuki menit ke 15 dan seterusnya.

Daftar Pustaka

1. Ambarita, Nishio. 2008. "Modifikasi Mesin Pendingin Adsorpsi Pada Komponen Kondensor, Reservoir, Katup Ekspansi Dan Evaporator". Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin UI.
2. Ariyono, Yudi. 2008. "Experiment of Adsorption System Refrigeration With Modification On Condensor, Reservoir, Expansion Valve, And Evaporator". Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin UI.
3. Imami, Khalif. 2008. "Pengujian Alat Pendingin Sistem Adsorpsi Dengan Variasi Temperatur Masuk Fluida Saat Desorpsi". Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin UI.
4. Indartono, Y.S., "Perkembangan Terkini Teknologi Refrigerasi", Artikel Iptek-Bidang Energi dan Sumber Daya Alam.

[http://www.beritaiptek.com/zberita-beritaiptek-2006-05-07-perkembangan-Terkini-Teknologi-Refrigerasi--\(1\).shmtl](http://www.beritaiptek.com/zberita-beritaiptek-2006-05-07-perkembangan-Terkini-Teknologi-Refrigerasi--(1).shmtl) (diakses Mei 2014).

5. Ginting, F.D. 2008. "Pengujian Alat Pendingin Sistem Adsorpsi Dua Adsorber Dengan Menggunakan Metanol 1000ml Sebagai Refrigeran". Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin UI.
6. Nasruddin, "Dynamic modeling and simulation of a two bed silica gel-water adsorption chiller." Disertation, Rwth Aachen, 2005, hal.3-12
7. Ponsw, Michel. 2008. "Principe of Adsorption Cycle for Refrigerator or Heat Pump". <http://perso.limsi.fr/mpons/pricyc.htm> (diakses 18 Maret 2014)
8. Purba, Oloan. 2013. "Pembuatan Alat Penguji Kapasitas Adsorpsi pada Mesin Pendingin Adsorpsi dengan Menggunakan Adsorben Karbon Aktif." Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin USU.
9. Riki Wendri. "Pembuatan dan pengujian alat pembuat es sistem adsorpsi menggunakan air sebagai media pemanas dan pendinginan adsorbent untuk pengembangan solar collector." Skripsi, program sarjana Fakultas Teknik Mesin UI, Depok, 2007.
10. Sharafian, A dan Bahrami, M. 2013. "Assessment of Adsorber bed Design in waste-heat driven adsorption cooling systems for vehicle air conditioning and refrigeration." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30(2014)440-451.
11. Saputra, Bobby Wahyu. 2008. "Desain Sistem dengan Dua Adsorber". Skripsi Sarjana. Program Studi Sarjana Teknik Mesin UI.