

BAB 2

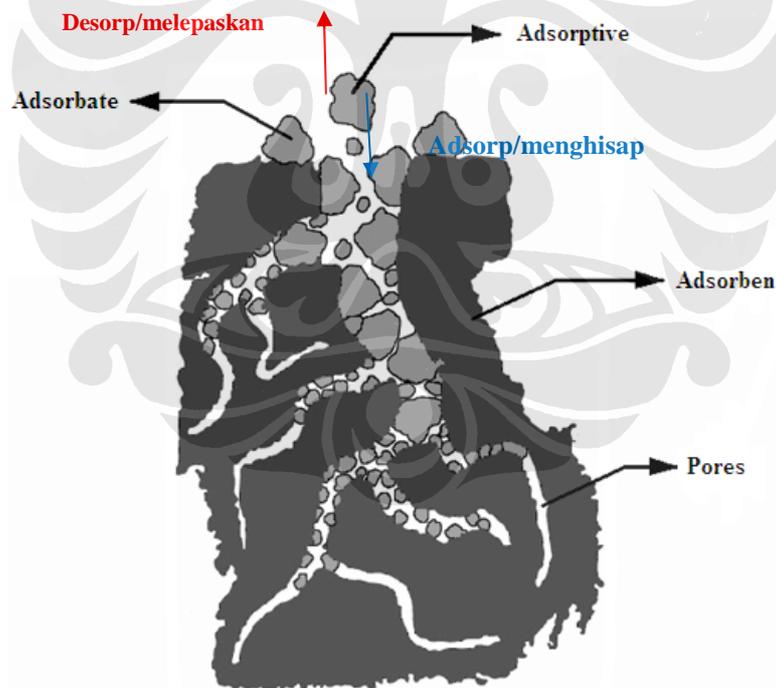
LANDASAN TEORI

2.1 Adsorpsi

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^[1].

Adsorpsi adalah proses dimana molekul fluida mengalami kontak dan melekat pada permukaan suatu material padat^[2].

Untuk mengetahui karakteristik yang terjadi dalam proses adsorpsi dapat diilustrasikan dengan gambar 2.1 dimana padatan berpori (*pores*) yang menghisap (*adsorp*) dan melepaskan (*desorp*) suatu fluida disebut adsorben. Molekul fluida yang dihisap tetapi tidak terakumulasi atau melekat ke permukaan adsorben disebut *adsorptive*, sedangkan yang terakumulasi disebut *adsorbat*



Gambar 2.1. Proses adsorpsi

Adsorpsi fisik utamanya disebabkan oleh gaya van der Waals dan gaya elektrostatik antara molekul adsorbat dan atom-atom yang membentuk permukaan adsorben^[3]. Gaya van der Waals merupakan gaya tarik-menarik antar molekul-molekul polar yang relatif lemah, sehingga mudah untuk terlepas kembali. Ketika

adsorben mengalami kontak dengan fluida dengan komposisi yang tepat, maka akan terjadi adsorpsi dan setelah cukup lama, adsorben dan fluida akan mencapai kesetimbangan^[3].

Sistem pendingin adsorpsi mendapatkan perhatian karena tidak terdapat bagian yang bergerak dan memungkinkan untuk menggunakan energi panas yang rendah seperti: energi panas matahari atau gas buang industri untuk regenerasi dalam adsorben^[3].

2.1.1 Adsorpsi Secara Fisika

Proses adsorpsi atau penyerapan adalah fenomena fisik yang terjadi saat molekul-molekul gas atau cair dikontakan dengan suatu padatan dan sebagian dari molekul-molekul tadi mengembun pada permukaan padatan tersebut. Apabila interaksi antara padatan dan molekul yang mengembun tadi relatif lemah, maka proses ini disebut adsorpsi fisik yang terjadi hanya karena gaya *van der Waals*.

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu penyerapan secara fisika (adsorpsi) dan penyerapan secara kimia (absorpsi).

Pada adsorpsi jenis ini, adsorpsi terjadi tanpa adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben. Molekul-molekul adsorbat terikat secara lemah karena adanya gaya *van der Waals*. Adsorpsi ini relatif berlangsung cepat dan bersifat reversibel (*reversible*). Karena dapat berlangsung di bawah temperatur kritis adsorbat yang relatif rendah, maka panas adsorpsi yang dilepaskan juga rendah. Adsorbat yang terikat secara lemah pada permukaan adsorben, dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke bagian permukaan lain. Peristiwa adsorpsi fisika menyebabkan molekul-molekul gas yang teradsorpsi mengalami kondensasi. Besarnya panas yang dilepaskan dalam proses adsorpsi fisika adalah kalor kondensasinya.

Proses adsorpsi fisik terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga proses tersebut membentuk lapisan jamak (*multilayers*) pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara *degassing* atau pemanasan pada temperatur 150-200 °C selama 2-3 jam.

2.1.2 Adsorpsi Secara kimia

Dalam hal ini, adsorpsi terjadi karena adanya reaksi kimia antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben. Adsorpsi jenis ini diberi istilah sebagai “*absorption*” dan bersifat tidak reversibel hanya membentuk satu lapisan tunggal (*monolayer*). Umumnya terjadi pada temperatur diatas temperatur kritis adsorbat. Sehingga kalor adsorpsi yang dibebaskan tinggi. Adsorben yang mengadsorpsi secara kimia pada umumnya sulit diregenerasi^[1].

2.2 Adsorben

Material penyerap atau adsorben adalah zat atau material yang mempunyai kemampuan untuk mengikat dan mempertahankan cairan atau gas didalamnya^[1]. Adapun beberapa adsorben yang digunakan secara komersial adalah kelompok polar adsorben atau disebut juga *hydrophilic* seperti silika gel, alumina aktif, dan zeolit.

Kelompok lainnya adalah kelompok non polar adsorben atau *hydrophobic* seperti polimer adsorben dan karbon aktif. Karakter fisik adsorben yang utama adalah karakter permukaannya, yaitu luas permukaan dan pori-porinya^[3]. Karakteristik adsorben dapat dilihat dari permukaannya seperti luas permukaan dan polaritas. Semakin luas permukaan spesifik, maka kemampuan adsorpsi juga semakin meningkat^[3]. Karakteristik adsorben yang dibutuhkan untuk adsorpsi^[1], adalah :

1. Luas permukaan besar sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
2. Memiliki aktifitas terhadap komponen yang diadsorpsi
3. Memiliki daya tahan yang baik
4. Tidak ada perubahan volume yang berarti selama peristiwa adsorpsi dan desorpsi.

Adsorben yang memiliki kemampuan menyerap air disebut *hydrophilic* yaitu silika gel, zeolit dan aktif alumina, sedangkan adsorben yang memiliki kemampuan menyerap oli dan gas disebut *hydrophobic* yaitu karbon aktif dan adsorben yang polimer^[3].

2.2.1. Silika Gel

Energi yang dibutuhkan untuk pengikatan adsorbat pada silika gel relatif kecil dibanding dengan energi yang dibutuhkan untuk mengikat adsorbat pada karbon aktif atau zeolit sehingga temperatur untuk desorpsinya rendah. Laju desorpsi silika gel terhadap kenaikan temperatur sangat tinggi. Silika gel dibuat dari silika murni dan secara kimia diikat dengan air. Jika silika gel diberi panas yang berlebih sampai kehilangan kadar air maka daya adsorpsinya akan hilang sehingga umumnya silika gel digunakan pada temperatur dibawah 200⁰C. Silika gel memiliki kapasitas menyerap air yang besar terutama pada saat tekanan uap air tinggi.

2.2.2. Karbon Aktif

Karbon aktif adalah suatu bahan berupa karbon amorf yang sebagian besar terdiri dari atas karbon bebas serta memiliki “ permukaan dalam” (*internal surface*) sehingga mempunyai kemampuan daya serap yang baik. Daya serap dari karbon aktif umumnya bergantung pada senyawa karbon berkisar 85% sampai 95% karbon bebas.

Pada dasarnya karbon aktif dapat dibuat dari bahan yang mengandung karbon, baik berasal dari tumbuhan, hewan maupun barang tambang. Bahan yang dapat dibuat menjadi karbon aktif diantaranya jenis kayu, sekam padi, tulang hewan, batu bara, tempurung kelapa, kulit biji kopi dan lain-lain.

Prinsip pembuatan karbon aktif adalah proses karbonasi yaitu proses pembentukan bahan menjadi arang (karbon), kemudian diaktivasi. Semua jenis adsorbat dapat digunakan sebagai pasangan karbon aktif, kecuali air^[2].

2.2.3. Zeolit

Zeolit digunakan untuk pengeringan dan pemisahan campuran hidrokarbon, zeolit memiliki kemampuan adsorpsi tinggi karena zeolit memiliki porositas yang tinggi. Zeolit mengandung kerystal 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.

2.2.4. Alumina

Adsorben alumina normalnya digunakan dalam industry untuk menghilangkan kadar air dari aliran gas. Salah satu yang sering digunakan untuk pengeringan adalah γ -alumina. Jenis ini memiliki luas permukaan yang baik untuk adsorpsi, volume *macropore* baik, dan rata-rata ukuran pori baik untuk transport molekul yang cepat dari lingkungan ke dalam alumina^[4].

2.3 Adsorbat

Adsorbat adalah substansi dalam bentuk cair atau gas yang terkonsentrasi pada permukaan adsorben. Adsorbat yang biasa digunakan pada sistim pendingin adalah air (*polar substances*) dan kelompok *non polar substances* seperti metanol, ethanol dan kelompok hidrokarbon^[3].

2.3.1. Air

Merupakan adsorbat yang ideal karena memiliki kalor laten spesifik terbesar, mudah didapat, murah, dan tidak beracun. Air dapat dijadikan pasangan zeolit, dan silika gel. Tekanan penguapan air yang rendah merupakan keterbatasan air sebagai adsorbat, sehingga menyebabkan :

1. Penggunaan air terbatas hanya untuk *air-conditioning* dan *chilling*.
2. Tekanan sistem selalu dibawah tekanan normal (1 atm). Sistem harus memiliki instalasi yang tidak bocor agar udara tidak masuk.
3. Rendahnya tekanan penguapan air menyebabkan rendahnya tekanan proses adsorpsi di batasi oleh transfer massa.

2.3.2. 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 adsorbat sampai -40 °C, dan dapat dipanaskan sampai 200 °C. Kerugian dari amonia :

1. Beracun, sehingga penggunaannya dibatasi.

2. Tidak dapat ditampung pada instalasi yang terbuat dari tembaga atau campurannya.

2.3.3. Metanol (CH₃OH)

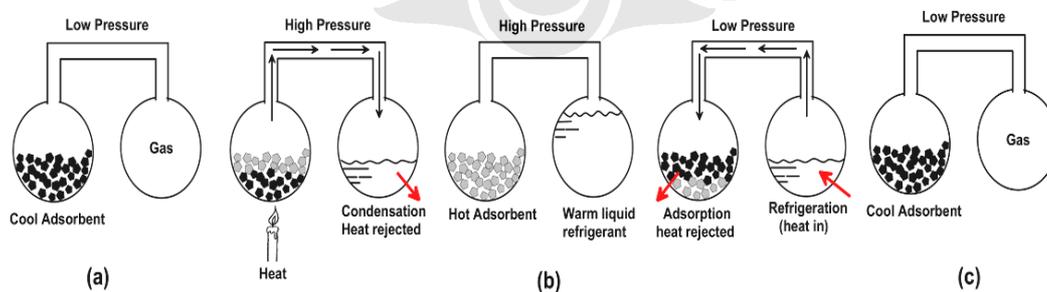
Di banyak hal kemampuan atau performa metanol berada diantara air dan amonia. Metanol memiliki tekanan penguapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan air (meskipun pada tekanan 1 atm), sehingga sangat cocok untuk sistem pendingin. Karbon aktif, silika gel dan zeolit merupakan adsorben yang menjadi pasangan dari metanol.

2.3.4. Karbondioksida (CO₂)

Karbondioksida merupakan persenyawaan antara karbon (27,3 wt%) dengan oksigen (72,7 wt%). Pada kondisi tekanan dan temperatur atmosfer, karbondioksida merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau. Karbondioksida juga merupakan gas tidak reaktif dan tidak beracun. Gas tersebut tidak mudah terbakar (*nonflammable*) dan tidak dapat memicu terjadinya pembakaran^[5].

2.4 Prinsip Sistem Pendinginan Adsorpsi

Siklus pendingin adsorpsi berlangsung dengan penyerapan refrigeran/adsorbat dalam fasa uap ke dalam adsorben pada tekanan rendah, kemudian refrigeran yang terserap pada adsorben didesorpsi dengan memberikan panas pada adsorben. Bentuk sederhana dari siklus pendingin adsorpsi seperti dua botol labu yang berhubungan seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Siklus sistim pendingin adsorpsi

Pada awalnya sistem dikondisikan pada tekanan dan temperatur rendah. Dua buah botol labu (*vessel*) yang berhubungan, dimana pada labu pertama terdapat

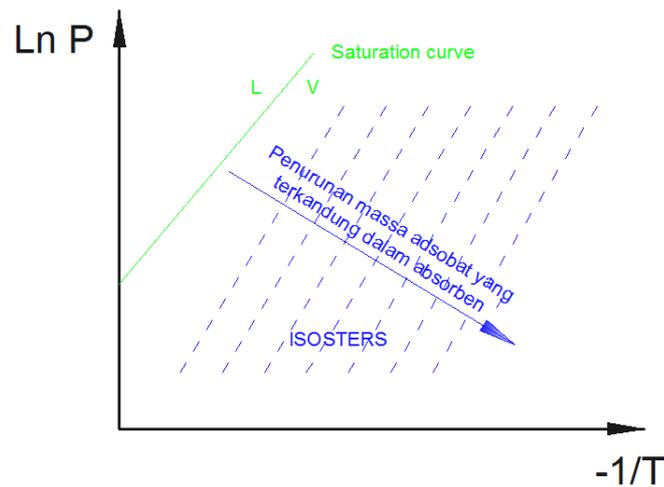
adsorben (karbon aktif) yang mengandung adsorbat berkonsentrasi tinggi sedangkan pada labu yang kedua terdapat adsorbat dalam fasa uap (Gambar 2.2a). Labu pertama yang berisi adsorben dengan kandungan adsorbat berkonsentrasi tinggi dipanaskan, sehingga tekanan sistim meningkat dan menyebabkan kandungan adsorbat yang ada didalam 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 sistem 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 sistem 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 2.2b) 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 2.2c) ^[2].

2.5 Siklus Ideal Sistem Pendingin Adsorpsi

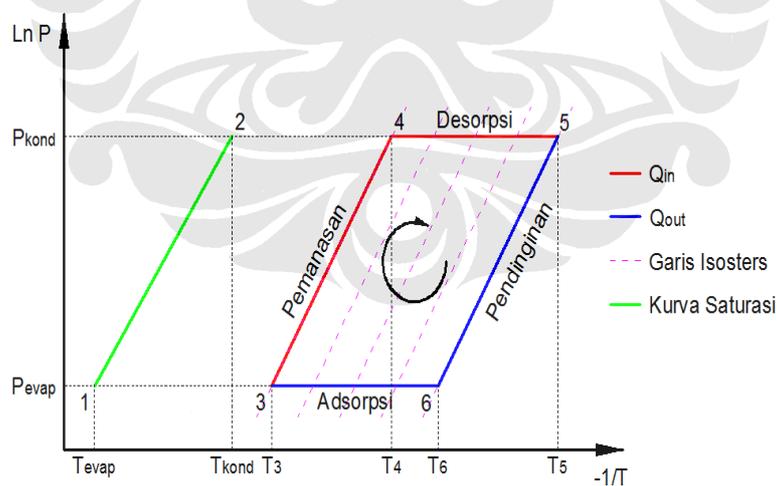
Adsorpsi dan desorpsi merupakan suatu proses yang dapat berlangsung secara reversibel. Adsorpsi merupakan proses *exothermic* dimana adsorben dan adsorbat melepaskan panas sehingga menyebabkan penurunan pergerakan molekul adsorbat yang mengakibatkan adsorbat tersebut menempel pada permukaan adsorben 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*. Jumlah adsorbat yang terkandung didalam adsorben dapat digambarkan oleh garis *isosters* pada diagram tekanan vs temperatur ($\ln P$ vs $-1/T$) seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Diagram tekanan vs temperatur yang menggambarkan garis isosters^[6]

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 2.4.



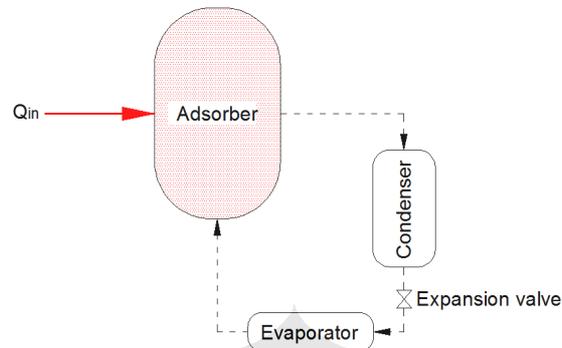
Gambar 2.4. Diagram clapeyron ideal^[6]

Keempat proses tersebut adalah sebagai berikut:

1. Proses pemanasan (pemberian tekanan)

Selama periode ini, tidak ada aliran metanol yang masuk maupun keluar dari adsorber. Adsorber menerima panas sehingga temperatur adsorber meningkat dan

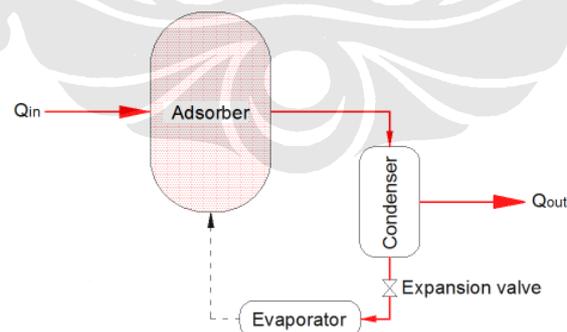
diikuti oleh peningkatan tekanan dari tekanan evaporasi menjadi tekanan kondensasi. Proses ini sama seperti proses kompresi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini dilustrasikan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Proses pemanasan^[6]

2. Proses pemanasan-desorpsi-kondensasi

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 pengembunan adsorbat diserap oleh media pendingin pada kondensor. Siklus ini sama dengan siklus kondensasi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini dilustrasikan pada gambar 2.6.

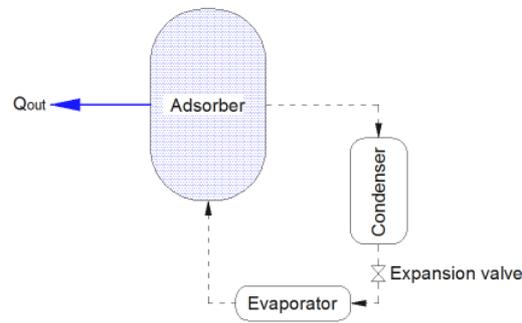


Gambar 2.6. Proses pemanasan-desorpsi-kondensasi^[6]

3. Proses pendinginan (penurunan tekanan)

Selama periode ini, tidak ada aliran metanol yang masuk maupun keluar dari adsorber. Adsorber melepaskan panas dengan cara didinginkan sehingga suhu di adsorber turun dan diikuti oleh penurunan tekanan dari tekanan kondensasi ke tekanan

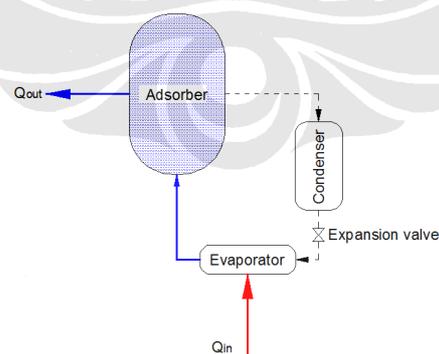
evaporasi. proses ini sama seperti proses ekspansi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Proses pendinginan^[6]

4. Proses pendinginan-adsorpsi-evaporasi

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^[6]. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Proses pendinginan-adsorpsi-evaporasi^[6]

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Daya adsorpsi dipengaruhi lima faktor^[7], yaitu :

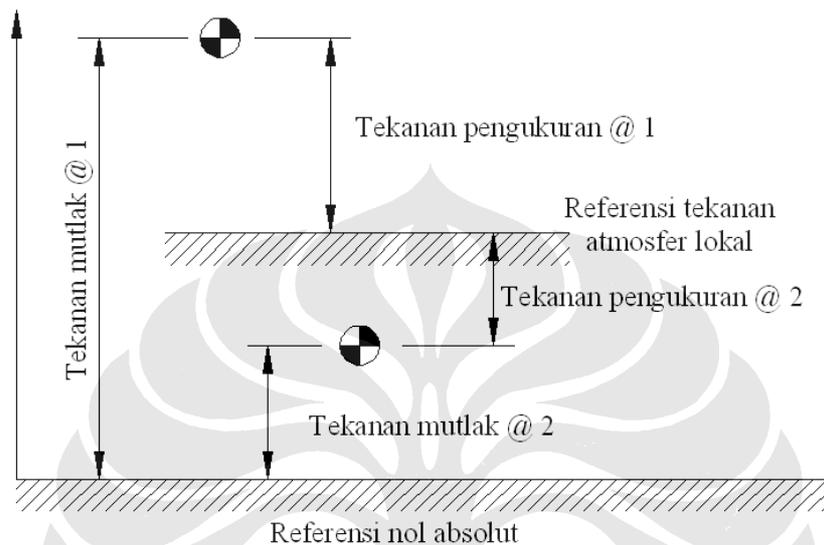
1. Jenis adsorbat
 - a. Ukuran molekul adsorbat
Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.
 - b. Kepolaran zat
Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul tidak polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang terlebih dahulu teradsorpsi.
2. Karakteristik adsorben
 - a. Kemurnian adsorben
Sebagai zat untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena kemampuan adsorpsi lebih baik.
 - b. Luas permukaan dan volume pori adsorben
Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben.
3. Temperatur absolut (T), temperatur yang dimaksud adalah temperatur adsorbat. Pada saat molekul-molekul gas atau adsorbat melekat pada permukaan adsorben akan terjadi pembebasan sejumlah energi yang dinamakan peristiwa eksotermis. Berkurangnya temperatur akan menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi demikian juga untuk peristiwa sebaliknya.
4. Tekanan (P), tekanan yang dimaksud adalah tekanan adsorbat. Kenaikkan tekanan adsorbat dapat menaikkan jumlah yang diadsorpsi.
5. Interaksi potensial (E), interaksi potensial antara adsorbat dengan dinding adsorben sangat bervariasi, tergantung dari sifat adsorbat-adsorben.

2.7 Pengukuran Tekanan

Pengukuran tekanan dapat dinyatakan dalam tekanan mutlak (*absolute pressure*) atau dalam tekanan pengukuran (*gage pressure*). Tekanan mutlak diukur relatif terhadap suatu keadaan hampa sempurna (tekanan nol mutlak), sementara

tekanan pengukuran diukur relatif terhadap tekanan atmosfer setempat. Jadi, tekanan pengukuran nol bersesuaian dengan tekanan yang sama dengan tekanan atmosfer setempat^[8].

Konsep mengenai tekanan mutlak dan tekanan pengukuran dapat dilihat pada gambar 2.9 untuk dua contoh tekanan pada titik 1 dan 2.



Gambar 2.9. Representasi grafik tekanan pengukuran dan tekanan mutlak

2.8 Tekanan Dan Temperatur Saturasi

Tekanan saturasi adalah tekanan yang terjadi pada saat suatu substansi pada temperatur tertentu mengalami perubahan fase. Temperatur saturasi yaitu temperatur pada saat suatu substansi berada dalam tekanan tertentu mengalami perubahan fase. Ketika substansi mengalami perubahan fase, substansi memerlukan ataupun melepaskan kalor laten tergantung perubahan fasa yang terjadi.

Data tekanan dan temperatur saturasi metanol yang digunakan pada percobaan alat adsorpsi dua adsorber dapat dilihat pada lampiran.