

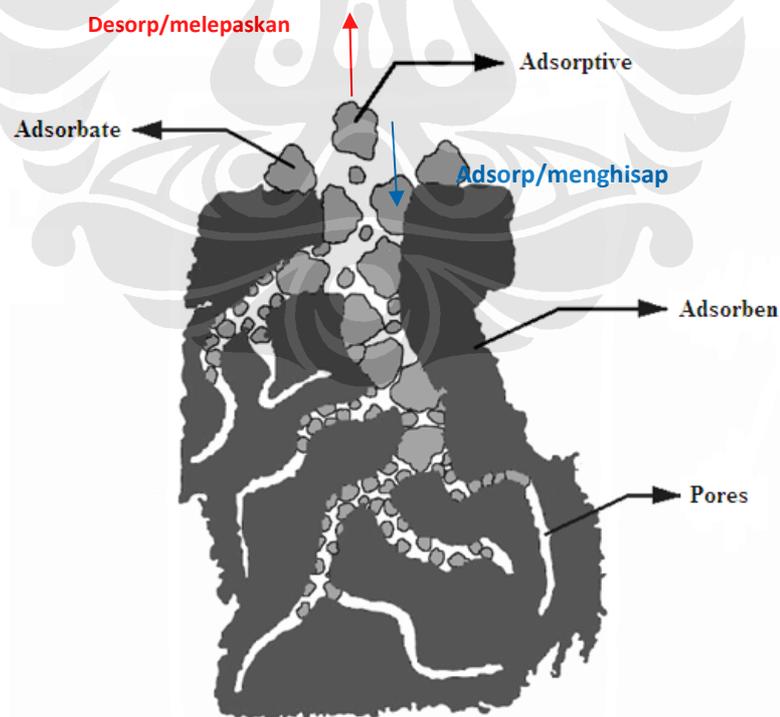
BAB 2

DASAR TEORI

2.1 ADSORPSI

Adsorpsi adalah suatu proses yang terjadi ketika suatu [fluida](#) ([cairan](#) maupun [gas](#)) terikat kepada suatu [padatan](#) dan akhirnya membentuk suatu [film](#) (lapisan tipis) pada permukaan padatan tersebut. Berbeda dengan [absorpsi](#), dimana fluida terserap oleh fluida lainnya dengan membentuk suatu [larutan](#). [4].

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



Gambar 2.1. *Adsorption Nomenclature* [5].

Pada umumnya proses adsorpsi diklasifikasikan menjadi dua proses yaitu proses adsorpsi secara fisik yang disebabkan oleh gaya *van der Waals*, dan secara kimia yang disebabkan melalui reaksi kimia antara molekul-molekul adsorbat dengan atom-atom penyusun permukaan adsorben [6]. Jika interaksi antara padatan dan molekul yang mengembun tadi relatif lemah, maka proses itu disebut sebagai adsorpsi fisik. Walaupun adsorpsi biasanya dikaitkan dengan perpindahan dari suatu gas atau cairan ke suatu permukaan padatan, perpindahan dari suatu gas ke suatu permukaan cairan juga terjadi. Substansi yang terkonsentrasi pada permukaan didefinisikan sebagai adsorbat dan material pada mana adsorbat terakumulasi didefinisikan sebagai adsorben. [7]

Pada dasarnya adsorben dibagi menjadi tiga yaitu, adsorben yang mengadsorpsi secara fisik (karbon aktif, silika gel dan zeolit), adsorben yang mengadsorpsi secara kimia (*calcium chloride*, *metal hydrides*, dan *complex salts*), dan *composite adsorbent* adsorben yang mengadsorpsi secara kimia dan fisik [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 [7].

2.2 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI ADSORPSI

Daya adsorpsi dipengaruhi oleh lima factor (Bahl et al, 1997 dan Suryawan, Bambang 2004), 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. Tekanan (P), Tekanan yang dimaksud adalah tekanan adsorbat. Kenaikan tekanan adsorbat dapat menaikkan jumlah yang diadsorpsi.

4. 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 *exothermic*. Berkurangnya temperatur akan menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi demikian juga untuk peristiwa sebaliknya.

5. Interaksi Potensial (E), interaksi potensial antara adsorbat dengan dinding adsorben sangat bervariasi, tergantung dari sifat adsorbat-adsorben.

2.3 PASANGAN ADSORBEN ADSORBAT

Pasangan adsorben-adsorbat untuk adsorpsi fisik adalah silika gel-air, zeolit-air, karbon aktif-amonia, karbon aktif-metanol [6]. Zeolit-air dan silika gel-air merupakan pasangan adsorben-adsorbat untuk *cool storage* sedangkan karbon aktif-metanol merupakan pasangan adsorben-adsorbat untuk pembuatan es [3].

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

1. Polar adsorben atau *Hydrophilic*, meliputi silica gel, zeolit, *active alumina*. Dengan air sebagai adsorbatnya.
2. Non-polar adsorben atau *Hydrophobic*, meliputi karbon aktif dan adsorben polimer. Dengan oli atau gas sebagai adsorbatnya [6].

2.3.1 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. Karakteristik adsorben yang dibutuhkan untuk adsorpsi :

1. Luas permukaannya besar, sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi.
2. Memiliki aktifitas terhadap komponen yang diadsorp.
3. Memiliki daya tahan guncang yang baik.
4. Tidak ada perubahan volume yang berarti selama proses adsorpsi dan desorpsi.

Macam-macam adsorben yang umum digunakan, antara lain :

a. Silika gel

Silika gel cenderung mengikat adsorbat dengan energi yang relatif lebih 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 dengan ikatan kimia mengandung air kurang lebih

5%. Pada umumnya temperatur kerja silika gel sampai pada 200 °C, jika dioperasikan lebih dari batas temperatur kerjanya maka kandungan air dalam silika gel akan hilang dan menyebabkan kemampuan adsorpsinya hilang. Bentuk butiran silika gel yang banyak digunakan untuk proses adsorpsi adalah seperti gambar 2.2.



Gambar 2.2 Bentuk butiran silika gel [9].

b. Aktif Karbon

Aktif karbon dapat dibuat dari batu bara, kayu, dan tempurung kelapa melalui proses *pyrolizing* dan *carburizing* pada temperatur 700 sampai 800 °C. Hampir semua adsorbat dapat diserap oleh karbon aktif kecuali air. Aktif karbon 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. Bentuk butiran karbon aktif adalah seperti gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bentuk butiran karbon aktif [10]

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. Bentuk butiran zeolit adalah seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4 Bentuk butiran zeolit [11].

2.3.2 Adsorbat

Adsorbat yang biasa digunakan untuk pendinginan adalah air, metanol, dan ammonia.

a. 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 :

- Temperatur penguapan rendah ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$), sehingga penggunaan air terbatas hanya untuk *air-conditioning dan chilling*.
- Tekanan sistem selalu dibawah tekanan normal (1 atm). Sistem harus memiliki instalasi yang tidak bocor agar udara tidak masuk.
- Rendahnya tekanan penguapan air menyebabkan rendahnya tekanan proses adsorpsi di batasi oleh transfer massa.

b. Metanol

Di banyak hal kemampuan atau performa metanol berada diantara air dan ammonia. Metanol memiliki tekanan penguapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan air (meskipun pada tekanan 1 atm), sehingga sangat cocok untuk membuat es. Meskipun demikian pada temperatur lebih dari 120 °C, tekanan menjadi tidak stabil. Untuk temperatur aplikasi lebih dari 200 °C adsorben yang biasa digunakan adalah karbon aktif, silika gel, dan zeolit.

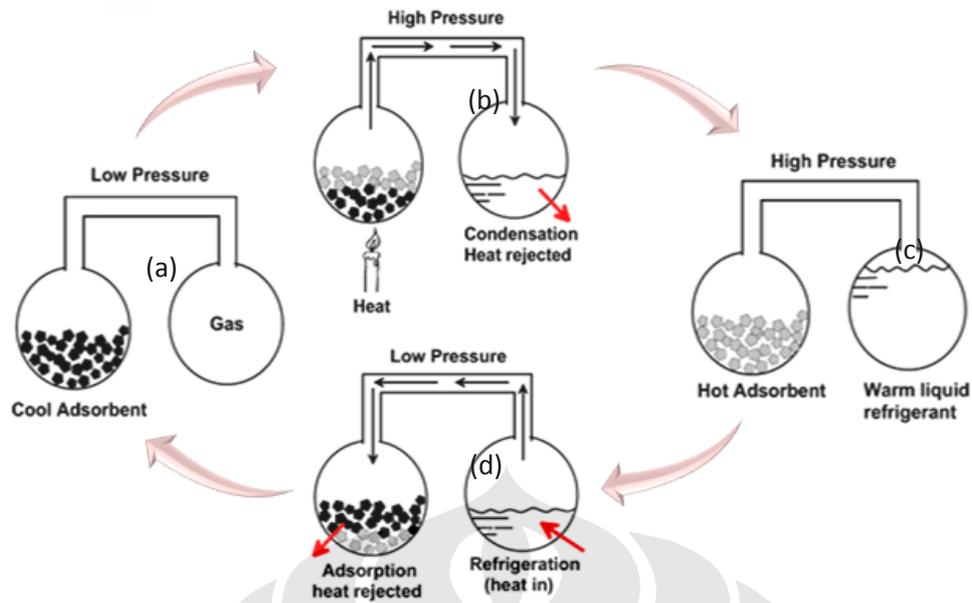
c. Ammonia

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

- Beracun, sehingga penggunaannya dibatasi.
- Tidak dapat ditampung pada instalasi yang terbuat dari tembaga atau campurannya [3].

2.4 PRINSIP SISTEM PENDINGINAN 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. Bentuk sederhana dari siklus pendingin adsorpsi seperti dua botol labu yang berhubungan seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Siklus sistim pendingin adsorpsi [13]

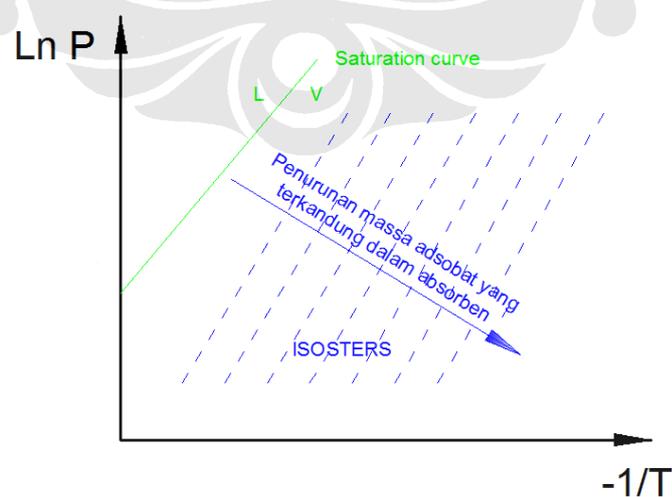
Pada awalnya sistem dikondisikan pada tekanan dan temperatur rendah. Dua buah botol labu (*vessel*) yang berhubungan, dimana pada labu pertama terdapat adsorben (karbon aktif) yang mengandung adsorbat berkonsentrasi tinggi sedangkan pada labu yang kedua terdapat adsorbat dalam fasa uap (Gambar 2.5a). Labu pertama yang berisi adsorben dengan kandungan adsorbat berkonsentrasi tinggi dipanaskan, sehingga tekanan sistim meningkat dan menyebabkan kandungan adsorbat yang ada 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 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 sistem 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) [13].

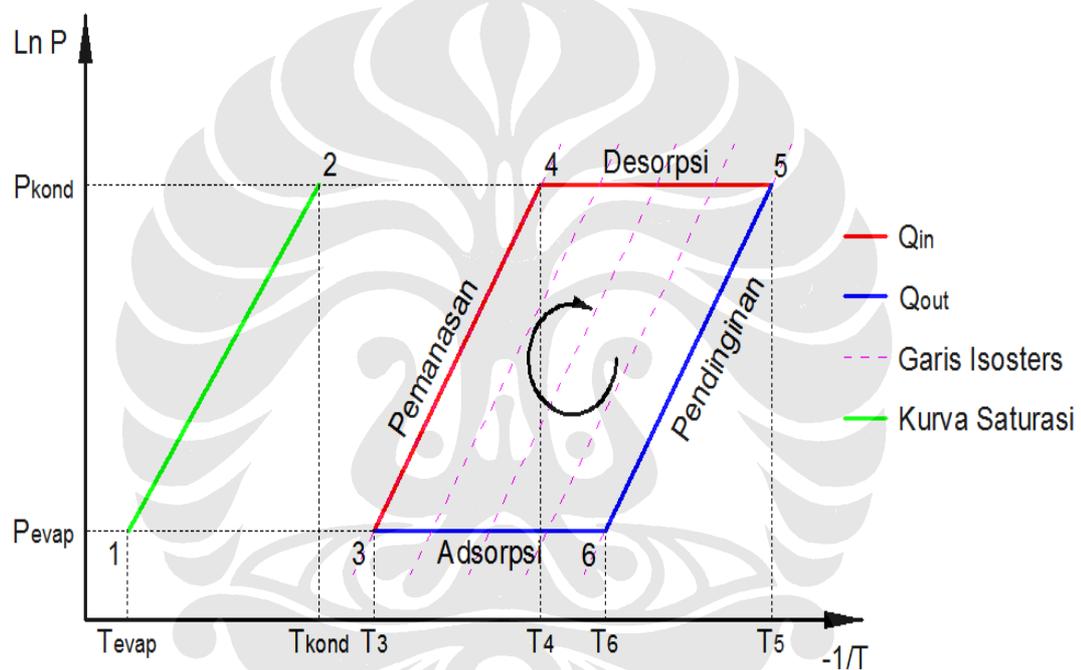
2.5 SIKLUS IDEAL SISTEM PENDINGIN ADSORPSI

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 menghancurkan 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 2.6.



Gambar 2.6. Diagram tekanan vs temperatur yang menggambarkan garis isosters [14].

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 2.7.



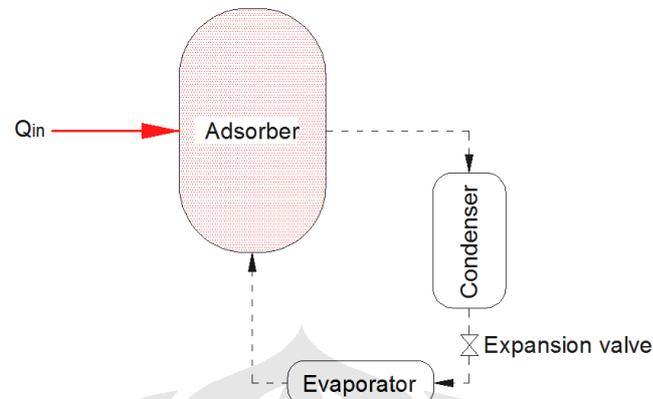
Gambar 2.7. Diagram Clapeyron ideal [14].

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

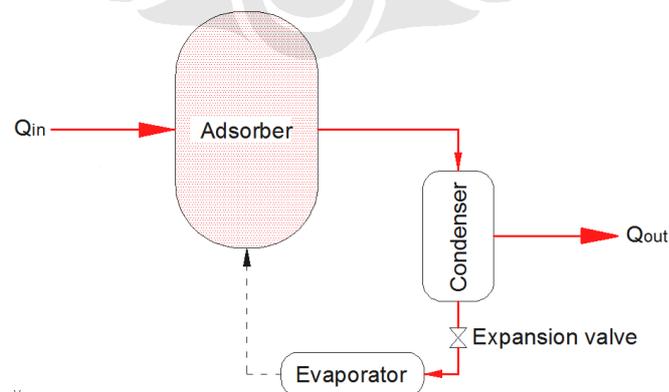
kondensasi. Proses ini sama seperti proses kompresi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Proses pemanasan [14].

2. Proses pemanasan-desorpsi-kondensasi

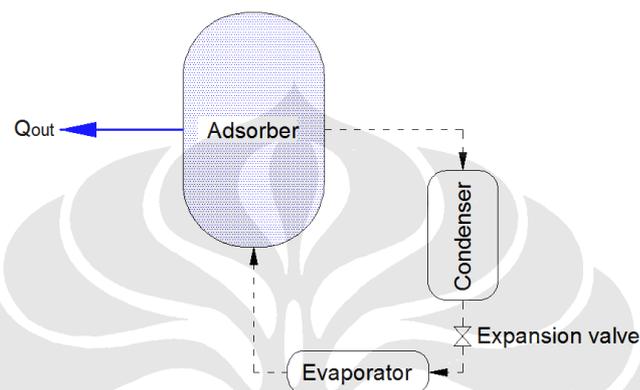
Selama periode ini, adsorber terus dialiri panas sehingga adsorber terus mengalami peningkatan dan temperatur yang menyebabkan timbulnya uap desorpsi. Sementara itu, katup aliran ke kondensor dibuka sehingga adsorbat dalam bentuk gas mengalir ke kondensor untuk mengalami proses kondensasi menjadi cair. Kalor laten pengembunan adsorbat diserap oleh media pendingin pada kondenser. Siklus ini sama dengan siklus kondensasi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9. Proses pemanasan-desorpsi-kondensasi [14].

3. Proses pendinginan (penurunan tekanan)

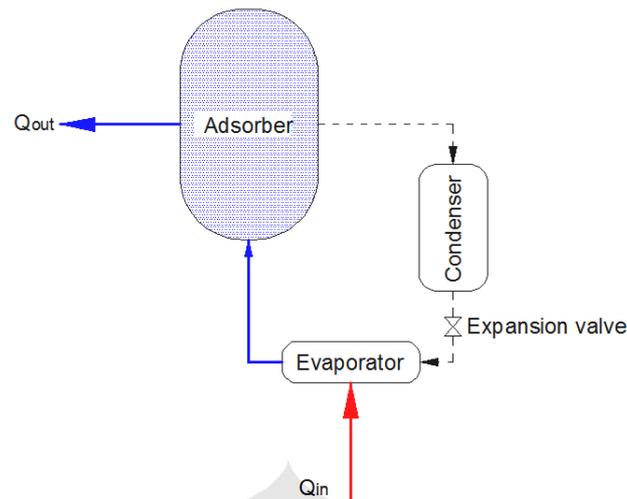
Selama periode ini, tidak ada aliran metanol yang masuk maupun keluar dari adsorber. Adsorber melepaskan panas dengan cara didinginkan sehingga suhu di adsorber turun dan diikuti oleh penurunan tekanan dari tekanan kondensasi ke tekanan evaporasi. proses ini sama seperti proses ekspansi pada sistem pendingin mekanik. Proses ini ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Proses pendinginan [14].

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 [14]. Proses ini diilustrasikan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Proses pendinginan-adsorpsi-evaporasi [14].

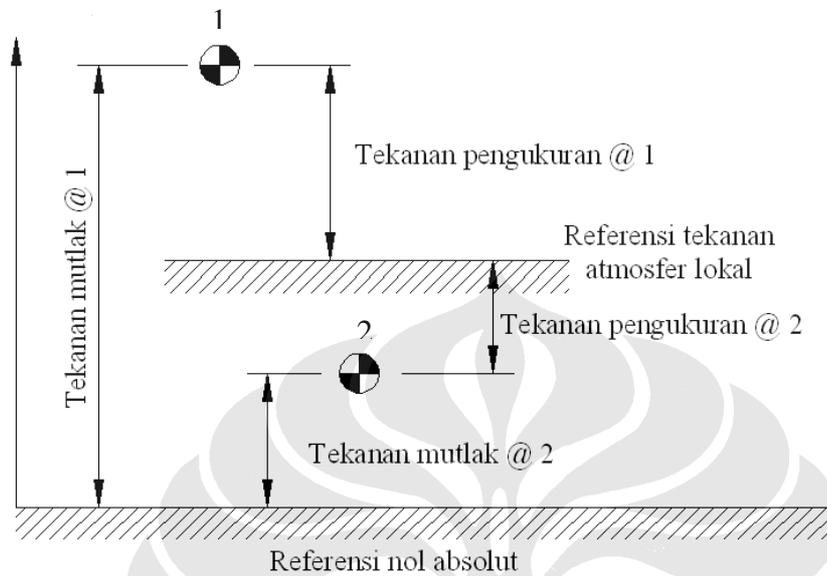
2.6 TEMPERATUR DAN TEKANAN SATURASI

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

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 (Munson, Bruce R.; Young, Donald F.; Okiishi, Theodore H., 2004)

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



Gambar 2.12. Representasi grafik tekanan pengukuran dan tekanan mutlak