

Hallgatói segédlet az abszorpció méréshez

Elméleti összefoglalás

Abszorpciónak nevezzük azt a műveletet, amikor egy gázelegy bizonyos komponensét vagy komponenseit egy arra alkalmas folyadékban (abszorbensben) oldjuk. Az abszorpció megvalósításához használt berendezés az abszorber vagy abszorpciós oszlop. A művelet során a komponensátadás jellemzően a gázfázisból a folyadékfázisba történik. Megkülönböztetünk fizikai és kémiai abszorpciót, más néven kemisorpciót. Fizikai abszorpció esetén az abszorbeált komponens és az abszorbens között nem megy végbe kémiai reakció. A kemisorpcióval ellentétben a fizikai abszorpció mindig reverzibilis, egyensúlyi folyamat.

Fizikai abszorpció esetén az abszorbeálandó komponens parciális nyomása és a folyadékfázisban lévő mólörtje közötti összefüggést a Henry-törvény írja le [1]:

$$p_A = H \cdot x_A \quad (1)$$

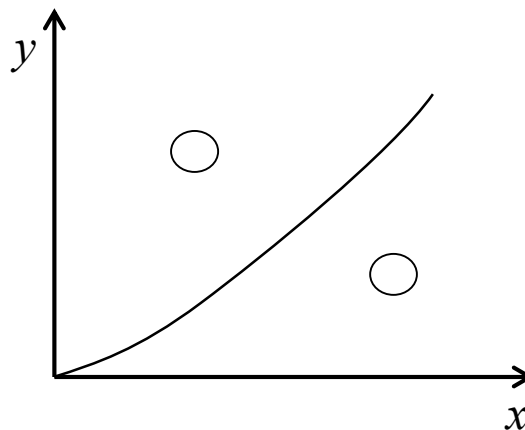
ahol p_A az abszorbeálandó (A) komponens parciális nyomása, az A komponens folyadékfázisbeli mólörtje, H a Henry-állandó. Az egyenletet az össznyomással elosztva a gázfázisbeli koncentráció és folyadékfázisbeli koncentráció közötti összefüggést kapjuk:

$$y_A = m \cdot x_A \quad (2)$$

ahol y_A az A anyag gőzfázisbeli mólörtje, m az (1) egyenletben definiált Henry-állandó és az össznyomás hányadosa. Az így definiált arányossági tényező függ az összetételtől, a nyomástól és a hőmérséklettől.

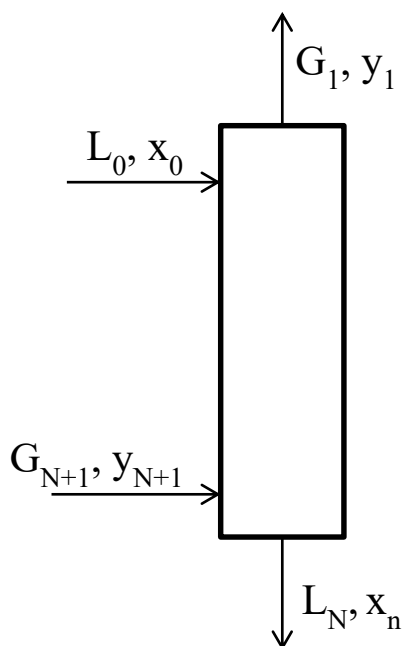
A Henry-törvény csak rosszul oldódó gázokra, kis folyadékkoncentrációk tartományában érvényes, nagyobb koncentrációknál eltérés tapasztalható. A Henry-törvény alkalmazhatóságát mindig ellenőrizni kell.

Az 1. ábra egy egyensúlyi összefüggést mutat be. Az egyensúlyi vonal nem egyenes, mivel az arányossági tényező függ a koncentrációtól.



1. ábra: Abszorpciós egyensúly

Ha egy egymással érintkező gáz-folyadék fázisok összetételét leíró pont az 1. ábra egyensúlyi görbéje felett van (1-es tartomány), akkor a gázfázis koncentrációja nagyobb, mint a vele érintkező folyadékfázis koncentrációjával egyensúlyt tartó koncentráció, ezért abszorpció játszódik le. Belátható, hogy a 2-es tartományban az előzővel ellentétes irányú folyamat, deszorpció játszódik le.



2. ábra: Abszorber sematikus vázlat

A 2. ábra jelöléseivel felírható egy N elméleti fokozatszámú, ellenáramú abszorbert mutat be. Az abszorber teljes anyagmérlege:

$$L_0 + G_{N+1} = L_N + G_1, \quad (3)$$

valamint a teljes komponensmérleg az abszorbeált komponensre:

$$L_0 x_0 + G_{N+1} y_{N+1} = L_N x_N + G_1 y_1 \quad (4)$$

Az egyenletekben L a folyadékfázis, G a gázfázis molárama, x az abszorbeált komponens folyadékfázisbeli móltörtje, y az abszorbeált komponens gázfázisban mért móltörtje. Az első n fokozatra felírt komponensmérleg alapján felírható az abszorber munkavonala, mely megadja az egyes fokozatok között egymás mellett elhaladó gáz- és folyadékáramok összetétele közötti összefüggést.

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{G_{n+1}} x_n + \frac{G y_1 - L_0 x_0}{G_{n+1}} \quad (5)$$

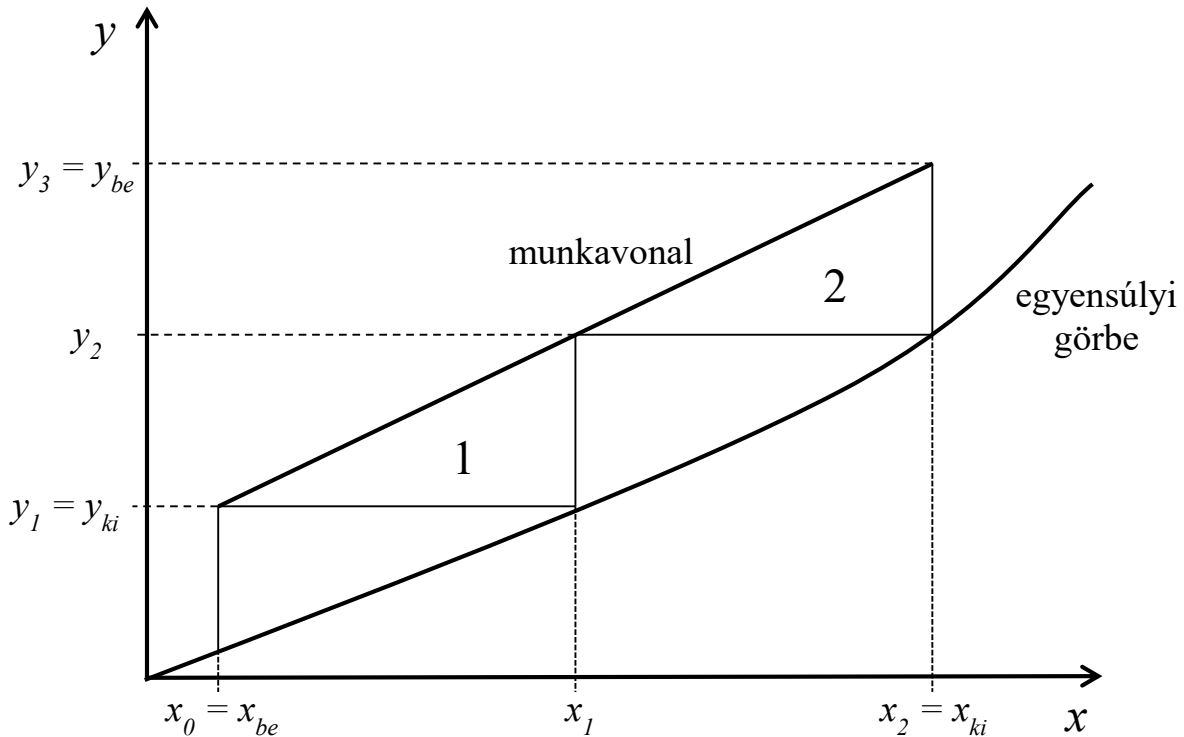
Az (5) egyenlet egyszerűsíthető, ha a következő feltételezésekkel élünk:

- az abszorbens a kinyerendő komponenst oldja, de a hordozó gázzal nem elegyedik,
- az abszorbens nem illékony,
- az abszorbens csak kis mennyiségben van jelen a bemenő gázáramban.

A fenti feltételezések mellett a folyadék- és gázáramok mennyisége állandónak tekinthető. A munkavonal egyenlete a fenti feltételek teljesülésekor:

$$y_{n+1} = \frac{L}{G} (x_n - x_0) + y_1 \quad (6)$$

A (6) egyenlet egy egyenest határoz meg, melynek meredeksége a gáz-folyadék arány, függőleges tengelymetszete pedig az abszorbens móltörtje a kimenő gázáramban. A (6) egyenlet és az egyensúlyi összefüggés ismeretében grafikusán meghatározható egy adott elválasztáshoz szükséges egyensúlyi fokozatszám.



3. ábra: Egyensúlyi fokozatszám meghatározása

A 3. ábra egyensúlyi vonala az egyes egységeket elhagyó áramokat, a munkavonal pedig az egymással szemben haladó áramok összetételét szemlélteti. Az egyensúlyi fokozatszám meghatározásához először felvesszük az előbbi görbéket. A szerkesztés kiindulópontja az oszlop tetejét elhagyó gáz ($y_1 = y_{ki}$) és a fokozatba belépő abszorbens ($x_0 = x_{be}$) által meghatározott pont. Ez az oszlop tetején belépő és kilépő, egymás mellett haladó áramok által meghatározott pont, tehát megadja a munkavonal egyik végpontját. Ezt követően az x_1 pontot az egyensúlyi görbéről olvassuk le, mivel az 1-es fokozatot elhagyó áramok x_1 és y_1 összetételei egymással egyensúlyt tartanak. A következő lépésben az $(x_1; y_1)$ pontból ismét átlépünk a munkavonalra, mivel az 1-es fokozatról lefelé haladó folyadékárammal a 2-es fokozatról felfelé áramló gázáram halad szemben, a következő így az $(x_1; y_2)$ pont. A szerkesztést addig folytatjuk, míg el nem érjük az abszorber alján kilépő áramok által meghatározott $(x_{ki}; y_{be})$ pontot. A kezdeti- és végpont közötti lépcsők száma megadja, hogy az abszorberben hányszor áll be az elméleti gáz-folyadék egyensúly, vagyis az elválasztáshoz hány elméleti tényérra van szükség.

Az elválasztáshoz szükséges fokozatszám az anyag- és komponensmérleg egyenletekből, valamint az egyensúlyi összefüggésből analitikusan is levezethető, amennyiben a (6) egyenlet feltételein kívül teljesül az is, hogy a (2) egyenlet m tényezője nem változik a művelet során. Az így levezethető a Kremser-egyenlet:

$$N = \frac{\lg \left[\frac{y_{N+1} - mx_0 \left(1 - \frac{1}{A} \right) \frac{1}{A}}{y_1 - mx_0 \left(1 - \frac{1}{A} \right) \frac{1}{A}} \right]}{\lg A} \quad (7)$$

ahol A az abszorpció tényező ($A = L/(mG)$), mely a munkavonal és az egyensúlyi vonal meredekségének hányadosa.

Töltött oszlopok esetén egy adott elválasztáshoz szükséges töltött oszloprész magassága anyagátadási egyenletek alapján is meghatározható. A levezetés eredménye:

$$Z = \frac{V}{K_G a S} \int_{y_{ki}}^{y_{be}} \frac{dy}{y-y^*} \quad (8)$$

ahol Z a töltött oszloprész magassága, mely két tényező szorzataként adódik. Az első tényező az átviteli egység magassága (HTU – *Height of a Transfer Unit*):

$$HTU = \frac{V}{K_G a S} \quad (8)$$

ahol $K_G a$ a térfogati anyagátbocsátási tényező ($\text{kmol}/(\text{m}^3\text{s})$), S az oszlop keresztmetszete (m^2). A második tényező az átviteli egységek száma (NTU – *Number of Transfer Units*):

$$NTU = \int_{y_{ki}}^{y_{be}} \frac{dy}{y-y^*} \quad (8)$$

ahol y^* az egyensúlyi gázfázisbeli koncentráció. Az első tényező a töltet hatékonyságát jellemzi, a második pedig megadja, hogy a kérdéses fázisban elérni kívánt változás hányszorosa a véges változás során kialakuló hajtóerő átlagának.

Az átviteli egységek száma analitikusan is számítható, ha az egyensúlyi összefüggés a műveleti tartományban egyenesnek tekinthető. A (2) egyenletet és az abszorpciós faktort behelyettesítve az integrálás elvégzése után a következő kifejezést kapjuk:

$$NTU_G = \frac{\ln \left[\left(\frac{A-1}{A} \right) \left(\frac{y_{be}-mx_{be}}{y_{ki}-mx_{be}} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\frac{A-1}{A}} \quad (9)$$

Ha az egyensúlyi összefüggés és a munkavonal egyenes és párhuzamos:

$$NTU = N \quad (10)$$

Ha az egyensúlyi összefüggés és a munkavonal is egyenes, de a meredekségük nem azonos:

$$NTU = N \left[\frac{\ln(1/A)}{(1-A)/A} \right] \quad (11)$$

Az átviteli egységek módszere mellett a leggyakrabban alkalmazott eljárás töltött oszlopok magasságának meghatározására a *HETP* módszer (*Height Equivalent to a Theoretical Plate*). Bár a töltött oszlopok folyamatos érintkezésű rendszerek, a *HETP* módszer az abszorber anyagátadási hatékonyságát a korábban bemutatott elméleti tényérekkel jellemzi. Definíció szerint az egy elméleti tényérnek megfelelő töltetmagasság (*HETP*) a teljes töltetmagasság és az elméleti tényérszám hányadosa. A töltetgyártó cégek leggyakrabban a *HETP*-et használják tölteteik minősítésére. Abszorberek tervezésénél így az elméleti tényérszám és a *HETP* ismeretében a szükséges töltetmagasság egyszerűen számítható:

$$Z = N * HETP \quad (12)$$

A *HETP* számítható a *HTU* alapján. Ha az egyensúlyi összefüggés és a munkavonal egyenes és párhuzamos:

$$HETP = HTU \quad (13)$$

Ha az egyensúlyi összefüggés és a munkavonal is egyenes, de a meredekségük nem azonos:

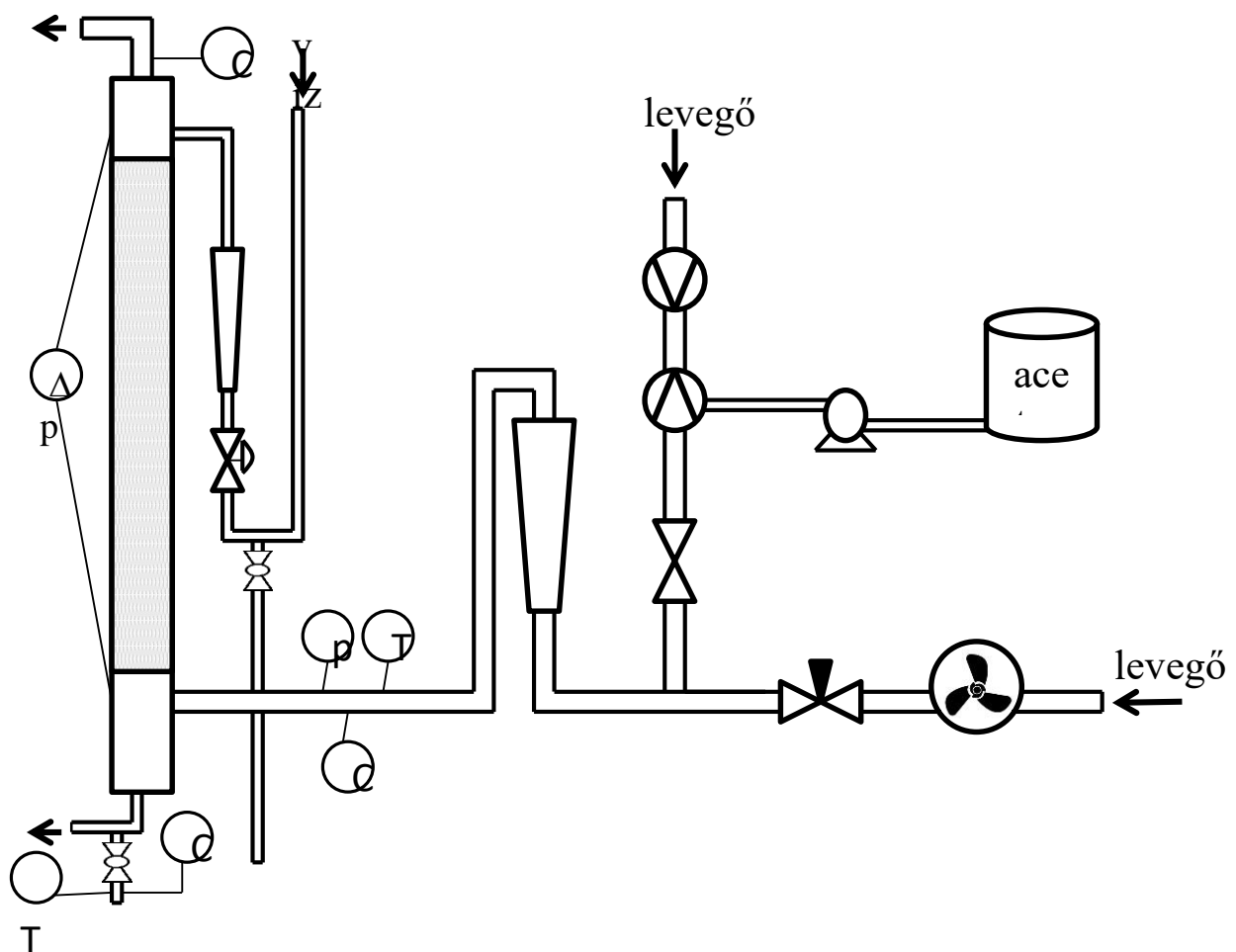
$$HETP = HTU \left[\frac{\ln(1/A)}{(1-A)/A} \right] \quad (14)$$

Az abszorpció gyakorlati alkalmazása

Az abszorpció a vegyipar széles körben alkalmazott művelete. Számos alkalmazásra találhatunk példát a klasszikus szerves vegyipari technológiákban: a kénsavgyártásnál képződő SO_3 elnyelése híg kénsavban történik, a sósavgyártásakor keletkező hidrogén-kloridot és a salétromsav gyártásakor keletkező nitrogén-oxidokat vízben nyeltek el. Napjainkban az abszorpciós folyamatok újszerű alkalmazásaira példa a fosszilis üzemanyagok elégetésekor keletkező szén-dioxid megkötése és tárolása (CCS – Carbon Capture and Storage), a metán biogázból történő kinyerése és az illékony szerves vegyületekből származó emisszió csökkentése.

A mérés leírása

Az alkalmazott berendezés elrendezési rajza a 4. ábrán látható.



4. ábra: A berendezés vázlatja

A mérés során acetonnal szennyezett levegőáram vízzel történő, ellenáramú abszorpcióját vizsgáljuk. Az abszorber belső átmérője 10,0 cm, az alkalmazott töltet a Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék műhelyében gyártott rendezett töltet, mely a készülék mellett megtekinthető.

A (2) egyenlet m tényezője (mol/mol dimenzióban) a mérés tartományában csak a hőmérséklet függvénye. Értékei:

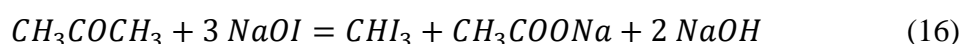
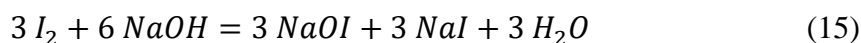
T [°C]	10	12	14	16	20
m [-]	1,03	1,13	1,25	1,37	1,64

Az abszorpciós oszlopba két áram lép be: az acetonnal szennyezett levegőáram és a tiszta víz. Az oszlopba belépő gázáram két áram összegeként adódik: az egyik a porlasztót elhagyó áram, a másik a kompresszorról érkező áram. A porlasztó kb. 200 g/h acetont porlaszt miközben 2,5 bar túlnyomású levegőt használ fel. Az acetont tartalmazó levegőáramot a kompresszorból érkező árammal együtt légköri nyomására expandáltatjuk. Az oszlop tetején távozik a tisztított levegő, alul pedig az acetonnal szennyezett folyadék.

Az abszorpciós mérésekhez ismerni kell az áramok mennyiségét, hőmérsékletét és koncentrációját. A térfogatáramok beállítása történik. A víz térfogatáramát mérő rotaméter felső méréshatára 100 lit/h.

A gázáramok koncentrációjának mérése, nyomon követése GMI PS200 gázérzékelővel történik. Az eszköz egy katalizátorral bevont drótot tartalmaz, amelyen az éghető gázok oxidálódnak. Az oxidáció következtében melegszik a drót, és megnő az elektromos ellenállása. Az ellenállás változása arányos a mérendő gáz koncentrációjával. Az ellenállás változását egy Wheatstone-híddal működő ellenállásmérő elektromos jellé alakítja, a mért érték megjelenik a szenzor kijelzőjén. A GMI PS200 gázérzékelő méréshatára 0-100 % ARH, felbontóképessége 0,1% ARH.

A folyadék koncentrációját az oszlopot alján vett mintából titrálással határozzuk meg. Az aceton lúgos jódoldatban jodoformmá oxidálódik:



A (15-16) egyenletek szerint egy molekula aceton 3 jódmolekulával reagál. A meghatározáshoz az oszlopból kilépő folyadékáramból mintát veszünk.

A mérés menete

1. Kapcsoljuk be a gázáramok koncentrációjának mérésére szolgáló GMI PS200 gázérzékelőket!
2. A víz térfogatáramát állítsuk az oktató által megadott értékre!
3. Indítsuk el az acetonos tartályhoz csatlakozó szivattyút, ellenőrizzük, hogy a vezeték csak folyadékot tartalmaz, majd a porlasztóhoz csatlakozó sűrített levegőt.
4. Állítsuk be a rotamétereken a mérésvezető által megadott értékeket!
5. A stacionárius állapot beállása után (az új állapot beállítását követően kb. 10-15 perc elteltével) vegyünk mintát az oszlopot elhagyó folyadékáramból, majd titráljuk meg! Mintavétel után jegyezzük fel a folyadék hőmérsékletét, ezt vegyük az abszorpció hőmérsékletének! Jegyezzük fel a bemenő gázáram hőmérsékletét és nyomását, a térfogatáramok pontos értékét, (levegő és víz) és hőmérsékletét!

6. A mérést kétféle üzemállapotban kell elvégezni. Egyszer a vizet az oszlop tetejére, majd az oszlop közepére vezetjük!
7. A mérés végeztével állítsuk le az acetonos tartályhoz csatlakozó szivattyút, a sűrített levegőt! Zárjuk el a rotaméter alatti szelepet, és nyissuk meg a leeresztő csapot! Kapcsoljuk ki a gázértékelőket!

A mérés kiértékelése

Az előbbi, három különböző mérési pontra végezzük el a következőket:

1. Határozzuk meg a gáz- és folyadék moláramokat és a folyadék-gáz arányt a mért térfogatáramok alapján! A gáz ideálisnak tekinthető.
2. Írjuk fel a komponensmérleget az acetonra (Számítsa ki a kilépő levegőáram acetontartalmát)!
3. Számítsuk ki az elméleti fokozatszámot a Kremser-egyenlet segítségével!
4. Számítsa ki az abszorpció hatásfokát: $Y = 1 - \frac{y_1}{y_{N+1}}$

A mérési leíratot a Tanszéki Munkaközösség korábbi munkáinak, illetve Kató Zoltán diplomamunkájának felhasználásával összeállította Angyalné Koczka Katalin.

Ellenőrizte: Kmecz Ildikó

Abszorpció

A mért adatok:

Acetonáram: _____ g/h _____ mol/h

Levegőáram: _____ m³/h _____ mol/h

y_{N+1} : _____

y_1 : _____

x_N : _____

Analízis:

I₂ oldat faktora: _____

Tioszulfát oldat faktora: _____

Légekőri nyomás: _____

Idő	porlasztó skr	Kieg levegő skr	Tvíz °C	V_viz lit/h	T_lev °C	skr	gázóra	idő	mérleg	idő