



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**PÓRUSOS ANYAGOK ALKALMAZÁSA A
GÁZELVÁLASZTÁSBAN**

BEADANDÓ ESSZÉ
PÓRUSOS ANYAGOK
BMEVEFAM210

KÉSZÍTETTE: JANCSI ÁKOS DÁVID

NEPTUN-KÓD: UKWIWB

OKTATÓ: DR. NAGYNÉ DR. LÁSZLÓ KRISZTINA

BUDAPEST, 2019

1. Bevezető

Elválasztásnak nevezzük azt a folyamatot, amely során anyagok keverékét két vagy több, egymástól összetételükben különböző terméké alakítunk át. Az elválasztást sok esetben nehéz megvalósítani, ugyanis ez a keverés ellentétes folyamata, amely folyamatot a termodinamika második főtétele előnyben részesít. [1]

A gázválasztás egy széleskörűen használt technológia, amely számos ipari folyamat szempontjából döntő fontosságú, például a kémiai és petrokémiai eljárásoknál, a széntüzelésű erőművek füstjeinek kezelésében, különös tekintettel a szén-dioxid eltávolítására az üvegházhatás csökkentése érdekében. Egyre növekvő érdeklődés mutatkozik más alkalmazásokra, például a kereskedelemben fontos gázok, mint például hidrogén, oxigén és metán a földgázból történő szétválasztására és tisztítására. [2]

2. Gázválasztási módszerek

A gázválasztás legelterjedtebb módszerei az oldószerrel/szorbensekkel, a kriogén desztillációval, valamint a membránokkal történő szétválasztás.

A szorbensekkel/oldószerrel történő elválasztás a gázok eltérő affinitásán alapszik egy adott szorbens iránt, ami lehet zeolit, alumínium-oxid, aktív szén stb. Használhatók oldószeres is erre a célra, mint például a MEA (metanolamin). Ennek a technológiának a legelterjedtebb változatai a nyomásingadozásos adszorpció (Pressure Swing Adsorption, PSA), a vákuumingadozásos adszorpció (Vacuum Swing Adsorption, VSA), valamint a hőmérsékletingadozásos adszorpció (Temperature Swing Adsorption, TSA).

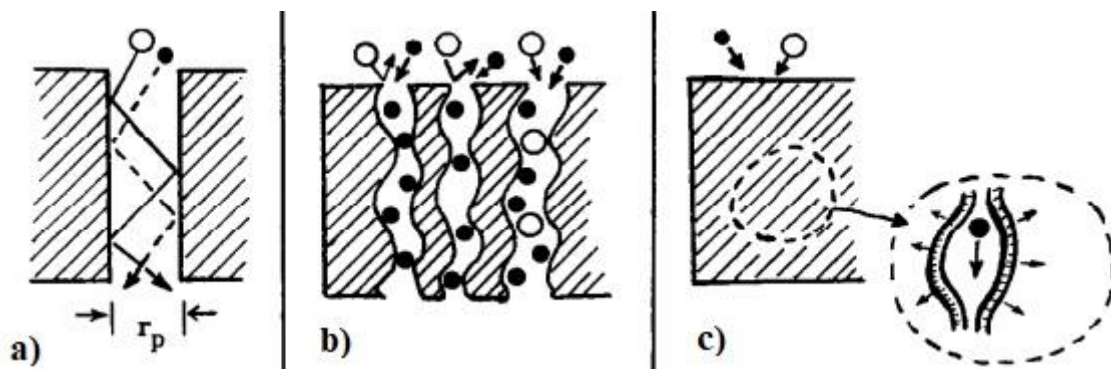
A nyomásingadozásos adszorpciónál (PSA) azt használják ki, hogy nagy nyomáson a gázok nagyobb mértékben képesek megkötődni a szilárd felületen (adszorbeálódni). A különböző gázok általában különböző mértékben képesek adszorbeálódni az adott felületen, ami így az alapját képezi ennek az elválasztási technikának. Ha egy gázkeveréket, például levegőt, nyomás alatt engedünk át olyan edényen keresztül, amely olyan zeolit ágyat tartalmaz, amely jobban vonzza a nitrogént, mint az oxigént, a nitrogén egy része vagy egésze megkötődik és az edényből kilépő gáz gazdagabb lesz oxigénben, mint a bejutó keverék. Amikor a zeolit eléri a nitrogén adszorpciók képességének végét, akkor a nyomás csökkentésével regenerálható, így felszabadítva az adszorbeált nitrogént. [3]

A vákuumingadozásos adszorpció (VSA) is hasonló elven működik annyi eltéréssel, hogy itt légköri nyomáshoz közeli nyomást alkalmaznak a gáz beadagolásához és vákuumot a szorbens regenerálásához. [4]

A hőmérsékletingadozásos adszorpció (TSA) esetében a regenerálást a hőmérséklet megnövelésével végzik, ugyanis állandó nyomáson a hőmérséklet növekedése az adszorbeált gázmennyiség csökkenéséhez vezet. [5]

A kriogén desztillációt leggyakrabban a levegőt alkotók komponensek szétválasztására alkalmazzák. A kriogén levegőszétválasztás azon alapul, hogy a nitrogén, oxigén, valamint az argon és a többi nemesgázok forráspontja, és ennek folytán cseppfolyós állapotban illékonyága, kisebb-nagyobb mértékben eltér egymástól, így a cseppfolyós levegő rektifikálásával, azaz folyamatos desztillációjával egymástól elkülönítve előállíthatók. [6]

A gázkeverékek hatékonyan elválaszthatók szintetikus membránokkal, amelyek polimerekből, például poliamidból, cellulóz-acetátból vagy nanopórusos anyagokból (szilícium-oxid, zeolit, fémorganikus szerkezetű, perovszkit membránok) készülnek. A membránok felhasználhatók a gázkeverékek elválasztására, ahol áteresztő gátként működnek, amelyeken keresztül a különböző anyagok különböző sebességgel mozognak, vagy egyáltalán nem mozognak. [7] A membránokon keresztül történő gázválasztásnak 3 fő transzportmechanizmusát különböztetjük meg: a Knudsen-diffúziót (a), molekuláris szitálást (b) és az oldat-diffúziót (c) (1. ábra). [8]



1) **ábra:** A membrán alapú gázválasztás fő mechanizmusainak vázlatos ábrázolása [8]

Szűk pórusokban, ha a nyomás nem túl nagy, a molekulák sokkal gyakrabban ütköznek a fallal, mint egymással, ami lassítja az anyagtranszportot. Abban az esetben, ha a pórusok átmérője kisebb vagy megegyezik a diffundáló anyag közepes szabad úthosszával, akkor az ilyen pórusrendszerekben lejátszódó diffúziót, Knudsen-féle diffúciónak nevezzük. [9]

A molekuláris szitálás abban az esetben fordul elő, ha a membrán pórusai túl kicsik ahhoz, hogy egy komponens áthaladhasson. Ez egy olyan eljárás, amely általában nem praktikus gázipari alkalmazásokban a kis méretű gázmolekulák miatt.

Az oldat-diffúziós elválasztás minden esetben az oldódási és mobilitási tényezőkön alapul. A diffúziós szelektivitás a legkisebb molekulát részesíti előnyben, miközben az oldhatóság szelektivitása a leginkább kondenzálódó molekulát részesíti előnyben. Az egyes komponensek szétválasztása a keverékben csak akkor hatékony, ha ezen komponensek legalább az egyik szempontból különböznek (diffúzió vagy oldódás).

3. Pórusos anyagok alkalmazása a gázválasztásban [1, 22]

Amint az a gázválasztási módszerek felsorolásából is jól látszik, a pórusos anyagok használata széleskörűen elterjedt ezekben az eljárásokban. Ugyanis a fentebb felsorolt három főbb módszer közül kettőben (adszorpció és membrános) nagyon gyakran alkalmaznak pórusos anyagokat. A következő részekben ezekről az anyagokról szeretnék egy összefoglalót csinálni.

Alapvetően minden mikropórusos anyag felhasználható szorbensként gázok tisztításához és elválasztásához. Például a csonthéjak, kalcinált agyagok, vas-oxid, kalcinált bauxit és hasonlóak mind megtalálhatók a kereskedelmi felhasználásban. Az általam tárgyalt szorbensek azonban jól szabályozott és nagy mennyiségű mikropórusokkal rendelkező anyagok.

A szorbens legfontosabb jellemzője a magas porozitás. A szorbens pórusos szerkezete standardizált technikákkal jellemezhető. A legfontosabb fizikai jellemzők közé tartozik a pórus térfogata, a pórusméreteloszlás és a fajlagos felület. Ugyancsak gyakorlati jelentőséggel bírnak a térfogatsűrűség, a nyomószilárdság és az eróziós ellenállás.

A szorbens felületét BET módszerrel lehet meghatározni, vagy egyszerűbb az egy pontos mérési módszerrel becsülni [10]. A teljes pórusmennyiség és a pórusméreteloszlás meghatározható például hélium- vagy higany-poroziméter alkalmazásával, esetleg N₂-adszorpció technikával, ami a Kelvin-egyenleten alapul.

4. Aktív szén

Az aktív szén gyártási folyamata a következő lépéseket foglalja magában: alapanyag előkészítése, granulálás, alacsony hőmérsékleten történő karbonizálás és aktiválás. Az aktív szén alapanyagai széntartalmú anyagok, például fa, tőzeg, szén, kőolajkocsz, antracit,

bitumenes szén stb. A kezdeti kezelés után az aktiválási folyamat magában foglalja az anyag karbonizálását 400-500 °C-on az illékony anyagok nagy részének eltávolítása céljából, majd a részleges gázosítást 800-1000 °C-on, hogy kialakuljanak a pórusok és ezáltal a nagy fajlagos felület. A gázosítási lépésben enyhe oxidáló gázt, például szén-dioxidot, vízgőzt vagy füstgázt használnak. Az ezen aktiválási folyamat során létrehozott aktív szén elsősorban gáz- és gőz-adszorpciós folyamatokhoz használható.

A kereskedelemben is használt másik aktiválási folyamat a kémiai aktiváció, amelyet általában lignin alapú prekursorok, például fűrészpor esetében használnak. Elő-karbonizálási lépésre itt nincs szükség. A lignint olyan aktiválószerrel keverik, mint például foszforsav, cink-klorid, kálium-szulfid vagy kálium-tiocianát és 500–900 °C hőmérsékleten karbonizálják. A fennmaradó vegyi anyagokat savval vagy vízzel mossák a szénből. A terméket, általában por formában, vizes vagy gázfázisú elválasztási célokra használják.

A prekursor alapanyag karbonizálása során a polinukleáris aromás vegyületek kondenzációja és az oldalsó csoportok leszakadása történik, ami szénmaradékot eredményez. Időközben térhálósodási reakciók játszódnak le. A karbonizálás önmagában nem elegendő a nagy porozitás kialakulásához, ezért szükség van a gázosítással történő aktiválásra. A kapott aktív szén különféle modellekkel leírható [11,12]. A legrepresentatívabb modell a hibás hatszögletű szénrétegű síkok sodrott hálózata, amelyet alifás hidcsoportok keresztkötnek. A síkok egy-, két-, három- vagy négyrétegűek. Egyszerű funkcionális csoportok (például C - OH, C = O), valamint heteroatomok (főleg oxigén és hidrogén) vannak beépítve a hálózatba.

Az aktivációs lépés elengedhetetlen a pórusméret-eloszlás testreszabásához. Mint említettem, ez a lépés alapvetően szabályozott gázosítás, gőz, CO₂ vagy O₂, valamint hozzáadott katalizátorok felhasználásával. A gázosítás fő funkciója a pórusok kiszélesítése, nagy mezoporozitás kialakítása. A fő katalizátorok a cink-klorid, foszforsav, kálium-hidroxid és kálium-szulfid. A különböző kémiai ágensek eltérő pórusszerkezetet eredményeznek; például a cink-klorid által aktivált szénben több a mezopórus, míg a KOH-val aktivált szénben a mikropórusok száma nagyobb, mindkettő nagy felületű, körülbelül 1000 m²/g [13].

Az aktív szén nagy, 300 és 4000 m²/g közötti fajlagos felület jellemzi, amely az összes szorbens közül a legnagyobb. Az aktív szénre jellemző a polimodális pórusméreteloszlás. A pórusszerkezetét úgy képzelhetjük el, hogy sok apró pórus van elágazva a nagyobb pórusokról, amelyek az egész részecskén keresztül hatolnak.

Számos adszorpciós tesztet használnak az adszorbensek tulajdonságainak jellemzésére. Az aktív szén hatékonyságát úgy határozzák meg, hogy szabványosított körülmények között mérik azt, hogy mennyit képes adszorbeálni egy bizonyos anyagból. Gázfázisú alkalmazásoknál a CCl_4 -ot alkalmazzák legtöbbször. A kereskedelemben kapható aktív szenek szén-tetraklorid száma 60 tömegszázalék körül van. A CCl_4 környezetre és az emberi egészségre gyakorolt káros hatásai miatt gyakran használják a bután számot, amely az anyag n-bután adszorpciós kapacitását méri.

Az aktív szén egyedülálló felületi tulajdonsága, szemben a többi fő szorbenssel, hogy felülete nem poláris, vagy csak enyhén poláris a felszíni oxidcsoportok és a szervetlen szennyeződések következtében. Ez az egyedülálló tulajdonság az aktív szén számára a következő előnyöket biztosítja:

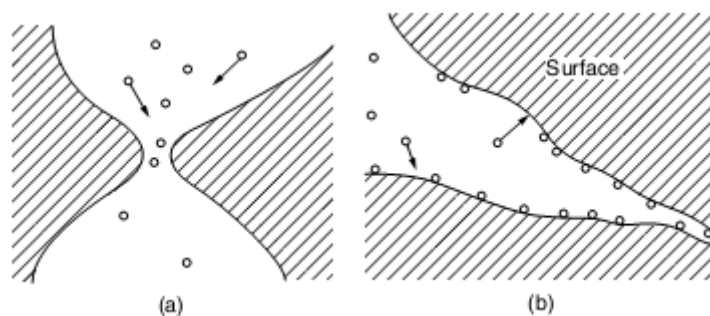
- használat előtt nincs szükség nedvesség eltávolításra
- könnyen hozzáférhető belső felülete miatt több apoláris és gyengén poláris szerves molekulát képes adszorbeálni, mint más szorbensek
- alacsony kötési-erősséggel rendelkezik, ami alacsonyabb energiaigényt eredményez a szorbens regenerálásánál

5. Szén molekulaszita

Mivel kevésbé hidrofil, mint a például zeolitok, a szén molekulaszita (CMS) hatékonyabban használható fel a nedves gázáramokat magukban foglaló szétválasztási folyamatokban, emiatt széleskörűen alkalmazzák nitrogén levegőből történő előállítás során.

A szén molekulasziták előállításának módjai: polimerek, például polivinilidén-klorid (PVDC) vagy Saran (vinilidén-klorid és vinil-klorid 90/10 arányú keveréke) karbonizálása [14]; antracit enyhe karbonizálása [15]; a kereskedelemben kapható aktív szén pórusainak bevonása karbonizált vagy koksztolt hőre keményedő polimerrel [16].

Kétféle CMS-t állítanak elő: az egyiket pórusok létrehozásával és kibővítésével (CMS H2), a másikat pedig a pórusok szája részleges blokkolásával (CMS N2). A CMS H2 gőzzel történő aktiválással készül. A CMS N2-t szénhidrogének, például benzol krakkolásával állítják elő annak érdekében, hogy vékony szénréteg kerüljön a pórusok szájába. Az előbbi H_2 és He tisztítására alkalmazzák, míg az utóbbi az N_2 levegőből történő előállításához használható.



2) **ábra:** A Bergbau-Forschung által előállított CMS-ek: (a) N₂ típusú CMS; (b) H₂ típusú CMS [17]

6. Aktivált alumínium-oxid

Az aktivált alumínium-oxid az egyik legnagyobb vízhez való affinitással rendelkező szilárd anyag. Emiatt a hidrofil tulajdonsága és nagy felülete miatt az aktivált alumínium-oxid nagyon elterjedt ipari alkalmazása a gázok és folyadékok szárítása. Az aktivált alumínium-oxid kifejezés nagy fajlagos felülettel rendelkező dehidrált vagy részlegesen dehidrált alumínium-oxid hidrátokra vonatkozik, amelyek lehetnek akár kristályosak, akár amorfak. Az ipari előállítása szinte kizárólag alumínium-hidroxid (Al(OH)₃) termikus dehidratációjával történik [18-20].

Az így kapott aktivált alumínium-oxid fajlagos felülete 300-350 m²/g között változik. Az aktivált alumínium-oxid pórus szerkezete erősen függ a hőkezelés körülményeitől. A hőkezelés folyamata nyilvánvalóan nagyon összetett. A dehidratáció, a kristályos átalakulás, a gázfejlődés és a szinterelés folyamatai mind lejátszódhatnak közben. A felületi savasság szintén egy meghatározó tulajdonság mind az adszorpció, mind a katalízis szempontjából. A felület savasságát savakkal, például sósavval és hidrogén-fluoriddal történő kezeléssel növelhetjük.

Így tehát jól látszik, hogy az aktivált alumínium-oxid pórus szerkezete és felületi kémiája nagymértékben manipulálható. Ennek eredményeként az aktivált alumínium-oxid nagyon sokoldalú szorbens, és specifikus alkalmazásokhoz testreszabható.

Az aktivált alumínium-oxidot szorbensként leginkább a szárításban használják. A kromatográfiában is alkalmazható. Az aktivált alumínium-oxiddal szárítható ipari gázok részleges felsorolása: Ar, He, H₂, kis szénatomszámú alkánok (főleg C₁-C₃) és szénhidrogének, Cl₂, HCl, SO₂, NH₃ stb. Különösen fontos az ásványolaj-frakciók termikus krakkolásával előállított szénhidrogének szárításakor. Kokszolás és szennyeződés következtében azonban hosszan tartó használat esetén az adszorpció kapacitása csökken.

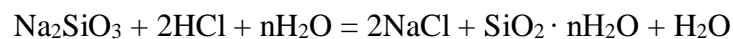
7. Szilikagél (SiO₂)

A szilikagél egy szintetikus pórusos amorf szilícium-dioxid (SiO₂), amely kolloid méretű gömb alakú szilícium-dioxid részecskékből áll, melyek merev, folytonos hálózatba vannak rendeződve. Számos előállítási módszer létezik, amelyek eltérő pórusszerkezeteket eredményeznek.

A szilikagél kétféle módon állítható elő: (1) kovasav (H₄SiO₄) polimerizációjával vagy (2) a kolloid szilícium-dioxid részecskék aggregációja által. A kovasav erősen hajlamos a polimerizálódásra és sziloxán (Si-O-Si) hálózat kialakítására, minimális számú kondenzálatlan Si-O-H csoportot hagyva. A pH-érték fontos a polimerizációs folyamatban [21]. A második módszer az egyenes méretű szilícium-dioxid részecskék koagulációja. Ezek a szubmikrométeres részecskék koagulálódhatnak van der Waals erők hatására vagy koagulánsként ható kationok segítségével.

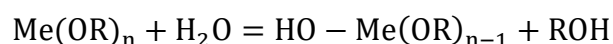
Leggyakrabban az első módszer alapján állítanak elő szilikagélt nátrium-szilikát oldat és valamilyen ásványi sav (például kénsav vagy sósav) reagáltatásával, amely reakció finoman elosztatott SiO₂-részecskék koncentrált diszperziójának létrejöttét eredményezi, amelyet szilícium-dioxid hidroszolnak neveznek.

A folyamat során lejátszódó reakció egyenlete:



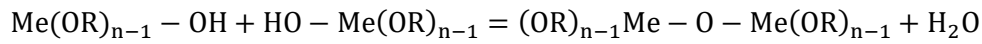
A hidroszol állás közben polimerizálódik, és fehér, zselés csapadék alakul ki belőle, amely maga a szilikagél. Az így kapott gélt ezt követően mossák, szárítják és aktiválják. Különböző szilikagélek, amelyek széles skálájú tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például a fajlagos felület, a pórusok térfogata stb. előállíthatók a szilícium-dioxid koncentrációjának, a hőmérsékletnek, pH-ak és az aktivációs hőmérsékletnek a megváltoztatásával.

A szilikagél előállításának újabb módja a szilícium-alkoxidok reakciója vízzel. Az ezt kihasználó folyamatokat szol-gél eljárásnak nevezik. Ez az eljárás két fő lépésből áll: az első a fém-alkoxidok hidrolízise:



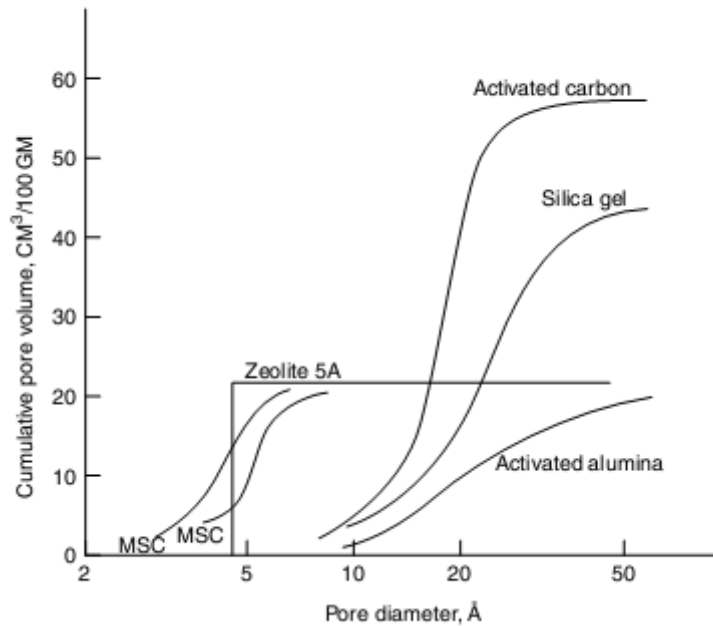
A második lépésben pedig a kis parciálisan hidrolizált molekulák képesek egymással kötést létrehozni, és lejátszódnak közöttük polikondenzációs reakciók:





A pórusok szerkezetét, valamint a képződő anyag felületét testreszabhatjuk a szol-gél módszerrel. A pH-érték a fő tényező a pórusméret szabályozásában. Az alacsony pH (például sósav hozzáadásával) mikroporozitást eredményez, míg a magas pH (például ammónium-hidroxid hozzáadásával) mezoporozitást eredményez. A pH befolyásolja a primer részecskék méreteloszlását és azt is, hogy ezek miként agglomerálódnak, és ezáltal a végső pórusszerkezetet.

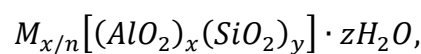
A szilikagélek két típusát különböztetik meg a sűrűségük alapján: létezik normál- és alacsony-sűrűségű. A normál-sűrűségű szilikagél fajlagos felülete 750-850 m²/g és az átlagos pórusátmérője pedig 22-26 Å, miközben az alacsony-sűrűségű változat megfelelő értékei 300-350 m²/g és 100-150 Å.



3) ábra: A legelterjedtebb adszorbensek (aktív szén, szilikagél, aktivált alumínium-oxid, zeolit, CMS) pórusméreteloszlásának összehasonlítása [1]

8. Zeolitok

A zeolitok alkáli vagy alkáli földfémek, például nátrium, kálium és kalcium kristályos alumínium-szilikátjai, a kémiai összetételük a következő:



ahol x és y egész szám, y/x értéke legalább 1, n az M kation vegyértéke, és z az egyes cellák vízmolekuláinak száma.

A zeolitok elsődleges szerkezeti egységei a szilícium és az alumínium tetraéderei, a SiO_4 és az AlO_4 . Ezek az egységek szekunder poliéderez épület egységekké (például kockák, hatszög alapú hasábok, oktaéderek, csonka oktaéderek) állnak össze. A poliéder sarkaiban található szilícium- és alumínium-atomokat oxigénatomok kötik össze. A szekunder egységek összeállásával egy szabályos háromdimenziós kristályszerkezet jön létre, ami a zeolitok végleges szerkezete. Az alumínium-szilikát váz üreges frakciója 0,2 és 0,5 közé esik.

A váz szabályos szerkezetű „ketrecekkel” rendelkezik, amelyeket az egyes ketrecek ablakai összekapcsolnak. A ketrecek nagy mennyiségű vendégmolekulát képesek adszorbeálni. Az ablaknyílások mérete, amelyet a kationok típusának és számának rögzítésével lehet szabályozni, 3-tól 8 Å -ig terjed. A szorpció nagy szelektivitással fordulhat elő a nyílás mérete miatt (és kisebb mértékben a ketrecek felületi tulajdonságai miatt). Az A típusú zeolit ablakai 8 tagú oxigényűrűkből állnak. Hasonlóképpen, az X típusú zeolit ablakait 12-gyűrűsnek nevezzük.

A Si/Al arány az A típusú zeolitokban általában egy, míg az X és Y típusok esetében jellemzően egy-öt. Néhány zeolitban az alumínium-atom eltávolítható és szilíciummal helyettesíthető, ezáltal csökkentve a kationok számát. A kationok is cserélhetők. Az ablakok belső atomjai oxigénatomok. Az ablakok mérete a gyűrű oxigénatomszámától függ (4, 5, 6, 8, 10 vagy 12). Mindhárom zeolit típust (A, X, Y) széleskörűen alkalmazzák gázválasztási eljárásokban.

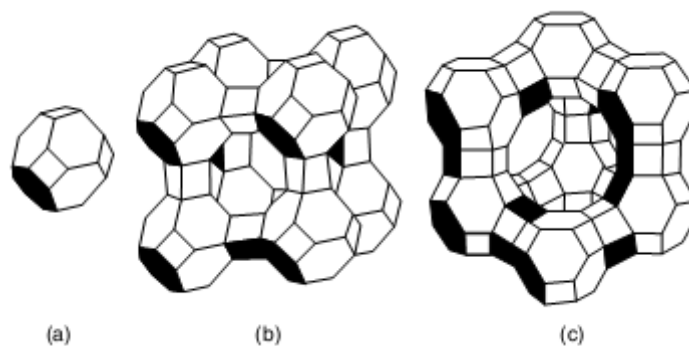
Az A típusú zeolit (Linde A vagy LTA), valamint az X és Y típus (faujasit vagy FAU) szerkezeti egysége a csonka oktaéder. Ezt az egységet szodalit ketrecnek vagy béta ketrecnek is nevezik. A szodalit egységek négytagú gyűrűi négyszög alapú hasábokon keresztül összekapcsolhatók, amely összekapcsolt szerkezetet A típusú zeolitnak nevezünk.

Az egyes cellákban 12 negatív töltés van, amelyeket a kationok egyenlítenek ki. Minden egyes zeolitban vannak olyan helyek, amelyekben a legnagyobb a kationok elhelyezkedésének valószínűsége. Ezek alapján a kationelhelyezkedési pontok alapján az A zeolitokat I, II és III csoportokba tudjuk sorolni.

Az A típusú zeolitokat nátrium formában szintetizálják, és így 12 nátrium-kationnal rendelkeznek. Ez a kereskedelemben kapható 4A típusú zeolit, amelynek rekesznyílás mérete 3,8 Å. A nátriumot más kationokkal is helyettesíthetjük. A kereskedelemben kapható 3A típusú zeolitot a Na^+ K^+ -val való cseréjével állítják elő, így kisebb effektív nyílásmérettel (3,0 Å)

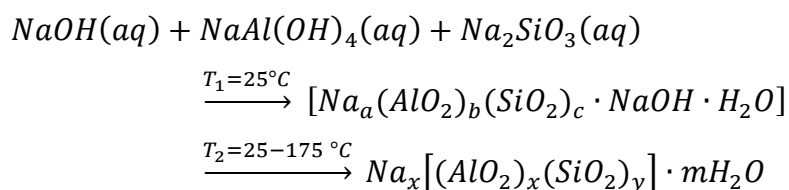
rendelkezik a nagyobb méretű K^+ miatt. Amennyiben 2 darab Na^+ -ot egy kettős töltésű kationra, például Ca^{+2} vagy Mg^{+2} -re cserélünk, létrejön az 5A típusú, 4,3 Å nyílásméretű zeolit. [23]

Az X és Y típusú zeolitok vázszerkezete megegyezik a természetben előforduló faujazitével. A szodalit egységeket hatszög alapú hasábok kapcsolják össze. Az X és Y típusú zeolitok közötti különbség az, hogy az X típus esetében a Si/Al arány 1-3 között mozog, míg az Y típus esetében pedig ez az érték nagyobb háromnál. A kereskedelemben elterjedt 10X zeolit Ca^{2+} fő kationnal rendelkezik, a 13X-ben pedig a Na^+ a fő kation. A zeolitok BET módszerrel meghatározott fajlagos felülete 500 és 800 m^2/g közé esik.



4) ábra: A zeolit szerkezetének lineáris ábrázolása: (a) szodalit ketrec vagy béta ketrec vagy csonka oktaéder; b) A típusú zeolit egységcella; c) X és Y típusú egységcellák

A zeolitok szintézisének alapanyagai az alkálifém-hidroxid, valamint szilícium-dioxidot és alumínium-oxidot tartalmazó nyersanyag. A szintézis a következő lépéseken keresztül játszódik le [23]:



Az első lépés a nátrium-hidroxid, a nátrium-szilikát és a nátrium-aluminát vizes oldatban lejátszódó szobahőmérsékleten történő gélképzése. A gél a szilikát és az aluminát kondenzációs-polimerizációs mechanizmussal lejátszódó kopolimerizálása során jön létre.

A géleket zárt hidrotermális rendszerben kristályosítják 25 és 175 °C közötti hőmérsékleten. Bizonyos esetekben 300 °C-os hőmérsékletet alkalmaznak. A kristályosodás ideje néhány órától néhány napig terjed. Amint a szintézis magasabb hőmérsékleten halad

tovább, zeolit kristályok képződnek, amelyet egy kristálynövekedési lépés követ, amely magában foglalja az alumínium-szilikátnak az oldatból történő asszimilációját. Az amorf gélfázis továbbra is feloldódik, ezáltal feltöltve az oldatot alumínium-szilikáttal. Ez a folyamat az amorf gél kristályos zeolittá alakulását eredményezi.

A zeolitok számos egyedi adszorpciós tulajdonsággal rendelkeznek, elsősorban egyedi felületi kémiájuk miatt. A váz felülete lényegében oxigénatomokból áll, míg a Si és Al atomok be vannak mélyedve az oxigénatomok tetraéderébe. Emiatt az adszorbeálódó molekulák nem férnek hozzájuk. Ezen kívül az oxigénatomok polarizálhatóbbak, mint a kationok. Ezért a sok anionos oxigénatom dominálja a van der Waals kölcsönhatásokat az adszorbeálódó molekulákkal. Néhány kation az oxidfelület felett helyezkedik el, és teljes mértékben elérhető. Állandó dipólokkal és kvadrupólokkal rendelkező adszorbeáló molekulák esetében ezeknek az elérhető kationoknak a kölcsönhatása gyakran uralja a teljes interakciós potenciált.

Az anionos felületi oxigének negatív töltéseket hordoznak. A töltés az oxigénnek a kationhelyekhez viszonyított helyétől és a kationtól is függ. Vizsgálatok során [24] összehasonlították a zeolitváz relatív anion-elektronegativitását egyszerű anionokkal (halogenidekkel), és azt találták, hogy a zeolit anion elektronegatívabb, mint az F^- .

Az erős anionos zeolitváz és a hozzá kapcsolódó erős kationok erős elektromos teret hoznak létre a felület környezetében, emellett pedig relatíve távol helyezkednek el egymáshoz képest. Ezeknek a jelenségeknek az együttes hatásai is fontos szerepet játszanak abban, hogy a zeolitok ilyen nagy adszorpciós készséggel rendelkeznek.

Irodalomjegyzék

- [1] Yang, Ralph T.: Gas Separation by Absorption Processes, Series on Chemical Engineering, Vol. I, World Scientific Publishing Co., Singapore, 1997
- [2] Carta, M. (2015): Gas Separation. Encyclopedia of Membranes, 1–3.
- [3] Sircar, S. (2002). Pressure Swing Adsorption. Industrial & Engineering Chemistry Research, 41(6), 1389–1392.
- [4] Ruthven, Douglas M., Principles of Absorption and Absorption Process, Wiley-InterScience, Hoboken, NJ, 2004, p. 1
- [5] M. A. Kalbassi, R. J. Allam, T. C. Golden (1997): Temperature swing adsorption, US5846295A
- [6] Castle, W. F. (2002). "Air separation and liquefaction: Recent developments and prospects for the beginning of the new millennium". International Journal of Refrigeration. 25: 158–172.
- [7] Kerry, Frank (2007). Industrial Gas Handbook: Gas Separation and Purification. CRC Press. pp. 275–280.
- [8] Koros, W. J., & Fleming, G. K. (1993). Membrane-based gas separation. Journal of Membrane Science, 83(1), 1–80.
- [9] R. Feres, G. Yablonsky (2004). Chemical Engineering Science 59, 1541.
- [10] Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journal of the American Chemical Society, 60(2), 309–319.
- [11] Barton, T. J., Bull, L. M., Klemperer, W. G., Loy, D. A., McEnaney, B., Misono, M., Monson, P. A., Pez, G., Sherer, G. W., Vartuli, J. A., and Yaghi, O. M. (1999) Chem. Mater. 11, 2633
- [12] Bandoz, T. J., Biggs, M. J., Gubbins, K. E., Hattori, Y., Iijima, T., Kaneko, K., Piku-nic, J., and Thomson, K. (2001) Chemistry and Physics of Carbon. Dekker, New York, NY.
- [13] Ahmadpour, A., King, B. A., and Do, D. D. (1998) Ind. Eng. Chem. Res. 37, 1329.

- [14] Lamond, T. G., Metcalfe, J. E., & Walker, P. L. (1965). 6Å molecular sieve properties of saran-type carbons. *Carbon*, 3(1), 59–63.
- [15] Patel, R. L., Nandi, S. P., & Walker, P. L. (1972). Molecular sieve characteristics of slightly activated anthracite. *Fuel*, 51(1), 47–51.
- [16] Walker, P. L., Jr., Austin, L. G., and Nandi, S. P. (1966a) *Chemistry and Physics of Carbon*. (P. L. Walker, Jr., ed.), Vol. 2. Marcel Dekker, New York, NY.
- [17] Jüntgen, H., Knoblauch, K., and Harder, K. (1981) *Fuel* 60, 817.
- [18] Pearson, A. (2003). Aluminum Oxide (Alumina), Activated. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- [19] U. S. Pat. 3,346,336 (Nov. 3, 1964), J. C. Hayes (to Universal Oil Products Co)
- [20] MacZura, G., Goodboy, K. P., and Koenig, J. J. (1977) In *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, Vol. 2, 3rd Edn. Wiley-Interscience, New York, NY.
- [21] Izumi, J. Mitsubishi VOC Recovery Process . Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (1996) Cited from Ying et al. (1999).
- [22] Yang, R. T. (2003). *Adsorbents: Fundamentals and Applications*.
- [23] Breck, D. W. (1974) *Zeolite Molecular Sieves*. Wiley, New York, NY.
- [24] Takahashi, A., Yang, F. H., and Yang, R. T. (2000) *Ind. Eng. Chem. Res.* 39.