

Nagynyomású fázisegyensúly vizsgálata opálosodási pont megfigyelésével

Bevezetés

A szuperkritikus oldószer felhasználási területei között az utóbbi két évtizedben egyre nagyobb szerepet kapnak a kémiai reakciók. Valójában a nagynyomású, „gázfázisú” reakciók jelentős része (pl. ammóniaszintézis, metanolszintézis, polietilén előállítás) szuperkritikus állapotban valósul meg. Ezeket a termékeket több évtizede nagyüzemi méretben gyártják. Így kialakulhatott az a vegyész-mérnöki, gépész-mérnöki gyakorlat, amely lehetővé teszi a nagynyomású berendezések (reaktorok) biztonságos tervezését, üzemeltetését. A szuperkritikus állapotú közeg (az oldószer, egyik reaktáns vagy az egész rendszer kritikus feletti állapotban van) hatását a kémiai reakció menetére csak a 70-es években kezdték vizsgálni. A témával foglalkozó publikációk száma a 80-as években ugrásszerűen megnövekedett és kialakult az extrakció és kromatográfia mellett a szuperkritikus oldószer egy új alkalmazási területe.

Annak, hogy egy kémiai/biokémiai reakciót szuperkritikus oldószerben (elsősorban széndioxidban vagy vízben) végezzenek, alapvetően két fő motivációja van. Egyik lehetőség, ha a korábban halogénezott vagy egyéb mérgező szerves oldószerben végzett reakció oldószercserével szuperkritikus oldószerben azonos szelektivitással és sebességgel elvégezhető. Ekkor a VOC (volatile organic compound) kibocsátás jelentősen csökkenthető, ami nemcsak környezeti és munkavédelmi szempontból fontos kérdés, hanem gazdaságossági szempontból is. Jelentős lehet egyrészt az oldószerveszteség a reakció feldolgozása során, másrészt az egyre szigorodó kibocsátási határértékeket csak egyre bonyolultabb és drágább megoldások alkalmazásával lehet betartani. Másik lehetőség, ha a reakció és/vagy a reakció utáni feldolgozóművelet (ún. downstream processing) során az egész gyártás gazdaságosságát növelő változást lehet elérni a szuperkritikus oldószer alkalmazásával.

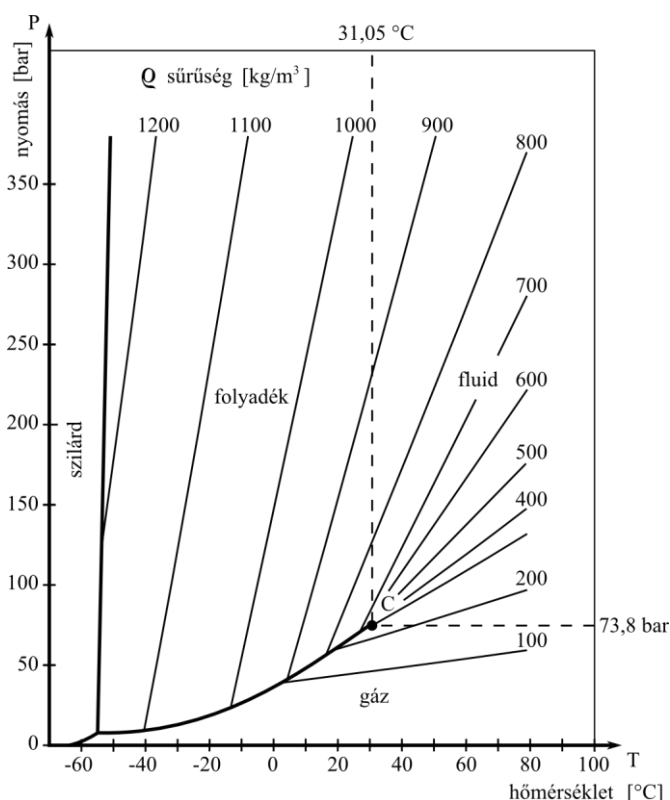
A szuperkritikus oldószer előnye, hogy két független és jól szabályozható paraméterrel, a nyomással és a hőmérséklettel az oldószer tulajdonságai (oldóképessége, a diffúziós állandó értéke, az anyagátadási tényező stb.) változtathatóak, és ezért egy reakcióelegy „finomhangolással” optimalizálható a maximális szelektivitás és/vagy maximális reakciósebesség elérése érdekében. Szén-dioxid ($P_C = 73,8$ bar, $T_C = 31$ °C) esetén a változtatható paraméterek közé szokás még venni a segédoldószer mennyiségét és minőségét, amit jellemzően 1–10%-ban adnak a rendszerhez. Segédoldószer lehet pl. etanol, de gyakran valamelyik reagens is segédoldószerként viselkedik, azaz növeli a többi komponens oldhatóságát. A „finomhangolás” mellett a másik meghatározó előny a hagyományos oldószerekkel szemben, hogy nyomáscsökkentés után az oldószerből a korábban oldott anyag kiválik. A szén-dioxid esetén azért, mert a szén-dioxid normál állapotban gáz-halmazállapotú, tehát ha a termék nem gáz (jellemzően folyadék vagy szilárd anyag), akkor a korábbi oldószer egyszerűen eltávozik a termékből. A víznél pedig azért egyszerű a termék-oldószer elválasztás, mert a szub- és szuperkritikus víz ($P_C = 22$ bar, $T_C = 374$ °C) apoláris oldószer,

míg az atmoszférikus állapotú víz poláris, ezért a szuperkritikus vízben jól oldódó komponensek az atmoszférikus és szobahőmérsékletű vízben gyengén oldódnak és vice versa.

A szuperkritikus oldószerek alkalmazásának legnagyobb hátránya maga a szükséges, viszonylag nagy nyomás (80–500 bar). Ez a nyomástartomány egyes iparágakban általánosan elfogadott és gyakran alkalmazott (pl. műanyagipar). Más iparágak, mint a finomkémiai és gyógyszeripar jelenleg ritkán használják. Kisméretű készülékekben azonban minden analitikai laborban található nagynyomású készülékeket, egy standard HPLC (high performance liquid chromatograph) működési tartománya lefedi a szuperkritikus oldószereknél is alkalmazott 80–500 bar-os tartományt.

Alapok

A gázok cseppfolyósodása nyomás hatására csak az anyagi minőségtől függő hőmérsékleti határ, a kritikus hőmérséklet alatt következik be. Azt a nyomást, amelyet a kritikus hőmérsékleten kell kifejteni ahhoz, hogy a cseppfolyósodás bekövetkezzen, kritikus nyomásnak nevezzük. Ha a kritikus hőmérséklete fölé hevített anyagot a kritikus nyomásnál nagyobb nyomással nyomjuk össze, az anyag homogén marad, fluid állapot jön létre. Ez a folyadék- és gázhalmazállapot közötti átmeneti állapot, amelyben az anyag tulajdonságai nagyon hasonlítanak a folyadék tulajdonságaihoz.



1. ábra. A szén-dioxid nyomás – hőmérséklet állapotdiagramja.

A szén-dioxid p-T állapotdiagramján (1. ábra) a szilárd, a folyadék és a gáz halmazállapotnak megfelelő területeket az olvadás, a forrás és a szublimációs görbék választják el. A kritikus pontot az ábrán C jelöli. A kritikus hőmérséklet és kritikus nyomás vonalai (szaggatott egyenesek) határolják a fluid állapotnak megfelelő területet. A szaggatott vonalakon átlépve

nem történik fázisállapot változás, nincs éles ugrásszerű változás a fizikai tulajdonságokban. Jól megfigyelhető ez a sűrűség vonalaknál (ρ), ahol a fluid állapotban a gáz sűrűségétől a folyadék sűrűségéig folytonos a változás.

A szuperkritikus oldószerek kiválasztási szempontjai

Bármely területen is alkalmaznak szuperkritikus oldószert, legyen az extrakció, reakció, kristályosítás, analitikai alkalmazás, meghatározó szerepe van az oldószer kiválasztásának. A körülményeket (nyomás, hőmérséklet) az oldószer kritikus adatai határozzák meg. A szuperkritikus extrakció számos normál állapotban gáz, illetve folyékony halmazállapotú anyaggal megvalósítható. A hagyományos extrakció oldószer-kiválasztásának általános szempontjai itt is érvényesek (legyen jó oldóhatású, könnyen hozzáférhető, olcsó, de ne legyen mérgező, a termékre, környezetre káros hatású és tűzveszélyes).

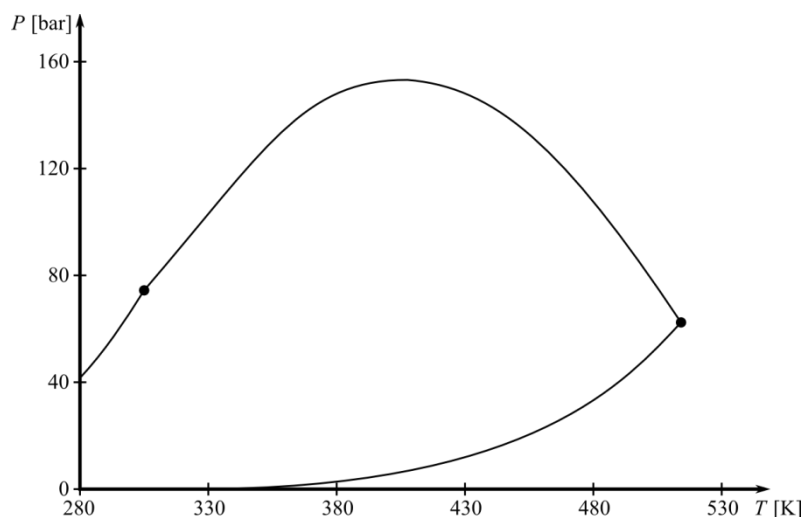
A szén-dioxidot a következő jó tulajdonságai miatt használják szívesen a szuperkritikus műveletekben oldószerek:

- nem káros az egészségre, ezért jól alkalmazható gyógyszerek, élelmiszerek és élvezeti cikkek előállításánál,
- nagy a sűrűsége, így viszonylag sok anyagot tud oldani,
- nem lép reakcióba a kezelt anyaggal,
- alacsony a kritikus hőmérséklete (31°C) és kritikus nyomása (73 bar), ezért alacsony hőmérsékleten lehet vele dolgozni, nem károsodik a kezelt anyag,
- nem tűzveszélyes és nem korrozív,
- könnyen beszerezhető élelmiszeripari tisztaságban és nagy mennyiségben áll a rendelkezésünkre,
- nem szennyezi a környezetet,
- az extrakció után maradék nélkül eltávozik a termékből,
- a nyomás és hőmérséklet megfelelő változtatásával lehetőség van a szuperkritikus állapotú oldószer oldóképességének kedvező irányba való változtatására.

Az apoláris szén-dioxid fluidban azonban főleg apoláris molekulák oldódnak. Az oldóképesség javítható keverék oldószer vagy kiegészítő oldószer alkalmazásával (pl. etanol). A segédoldószer kis mennyiségben is jelentősen megváltoztathatja az elegy kritikus pontját (2. ábra). Szemléltetésül az 1. táblázatban kis etanol mennyiség hatását láthatjuk az elegy kritikus pontjára szén-dioxid főtömeg esetében.

1. táblázat Etanol entrainer hatása szén-dioxidban az elegy kritikus pontjára

etanol tartalom [mol%]	T_C [$^{\circ}\text{C}$]	P_C [bar]
0	31,3	73,8
1	32,7	76,6
2	35,7	78,3
4	40,5	84,3



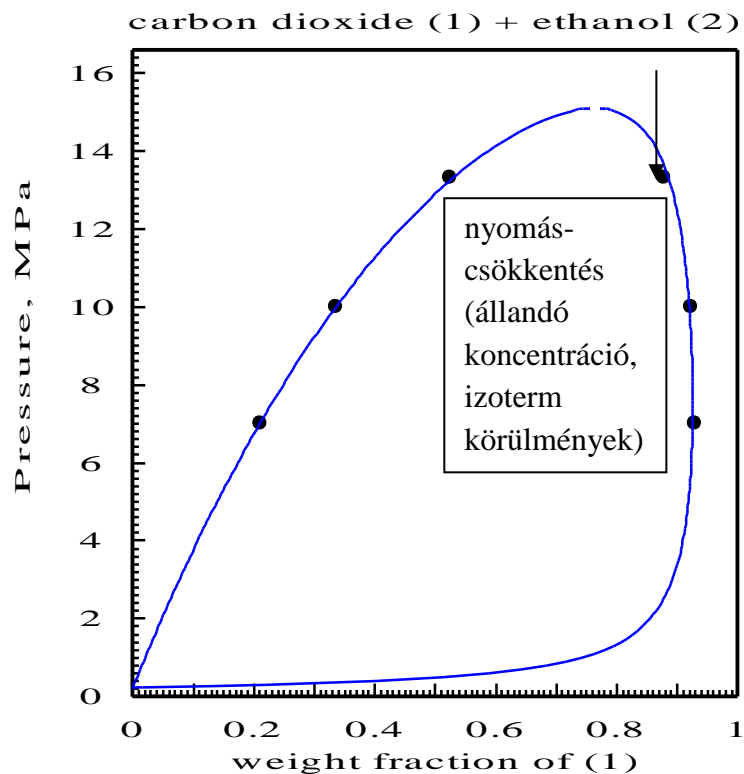
2. ábra. Az etanol - szén-dioxid elegy kritikus pontjai. Minden összetartozó hőmérséklet – nyomás érték más – más összetételnek felel meg. A négyzetek a tiszta komponensek kritikus pontjait jelölik.

Opálosodási pont (cloud point)

Opálosodási pontnak nevezzük azt, amikor a homogén fázisú oldatból nyomáscsökkentés hatására túltelített oldat keletkezik, ezért jól láthatóan opálos, ködös lesz. Az opálosodásra jellemző az összetétel, a nyomás és a hőmérséklet. Az opálosodási nyomás és hőmérséklet érték szükségszerűen alacsonyabb, mint az adott összetételhez tartozó kritikus nyomás és hőmérséklet érték. A jelenség megfigyelhető a 3. ábrán, ahol példaként 100 °C-on látható a fázisdiagram CO₂- etanol rendszerre (az CO₂ az 1-es komponens).

A laborgyakorlat célja két összetételnél több különböző hőmérsékleten megfigyelni a szétváláshoz tartozó nyomásértéket.

T = 373,1500 K
 CO₂ + Ethanol
 Author: Pfohl, 1998
 EOS: Peng-Robinson
 MR: Quadratic
 k(1,2)= 0.0606 l(1,2)=-0.0587

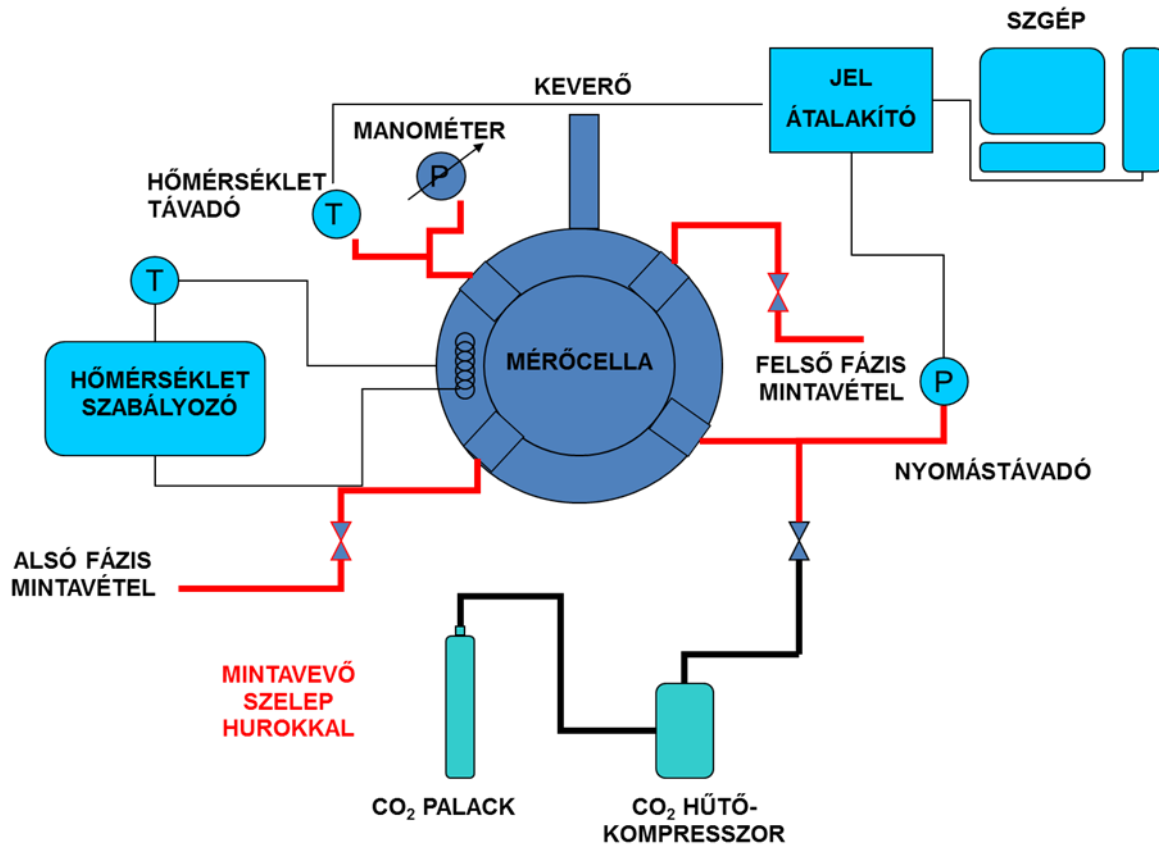


3. ábra. CO₂- etanol rendszer izoterm fázisdiagramja 100 °C-on. A nyíl az izoterm, állandó koncentrációnak megfelelő változtatást jelöli. A két fázisú területbe belépéskor történik az opálosodás.

Az elvégzendő mérés

A gyakorlat során szén-dioxid és egy választott oldószer (pl. etanol, aceton, metanol) elegy opálosodási pontját figyeljük meg több különböző hőmérsékleten és két különböző koncentrációjú bemérésnél. A mérési pontokat el kell helyezni az irodalomból fellelt kísérleti mérési pontokat és az állapotegyenlettel számolt nyomás-összetétel értékeket tartalmazó diagramon (adott hőmérsékleten).

A mérés során használt nagynyomású készülék sematikus rajza az 4. ábrán látható. A cella első fala egy nyomásálló zafír ablak. A hátsó fal mozgatható dugattyú. A mérés során izoterm körülmények között, a cellatér fogat változtatásával szabályozzuk a nyomást a belső térben. Meg kell határozni a homogén fázisú elegy sűrűségét is.



4. ábra. A méréshez használt nagynyomású optikai cella sematikus rajza.

A beugró után a csoportot kétfelé osztjuk (/I. és /II.), hogy mindenkinek legyen lehetősége a készüléket használni.

A mérés megkezdése előtt a csoport egyik fele (/I.) a mérésvezető segítségével meghatározza a bemérési pontos menetet.

Ennek lépései:

- Oldószer kiválasztása
- Első bemérési koncentráció kiválasztása a rendelkezésre bocsátott izoterm fázisdiagramok segítségével (feltétel: 35-45 °C vagy 45-60 °C hőmérséklettartományban jól mérhető opálosodási nyomás legyen, az oldat még hígítható legyen. A hőmérséklettartomány választása az Önök feladata).
- A bemérendő oldószer tömegének meghatározása (cella minimális térfogat 44 mL, a nyomást Önök választják, de essen a homogén fázisba, a sűrűséget a választott nyomáshoz leolvassák).

Ezalatt a /II. csoportfél megismeri az látóüveges cellát és megfigyeli a szén-dioxid kritikus pontját. Amíg /I. csoport tagjai a számolás befejezése utána elvégzik ezt a feladatot, a /II. csoporttagok kiszámítják a maximális hígítást és az így elérhető összetételt.

Ennek lépései:

- A /I. csoportfél által számított adatokból indulnak ki.
- Meg kell határozni a cellatérfogatot a tervezett bemért anyagmennyiség 45 vagy 65 °C-ra fűtésekor (a választott hőmérséklettartomány felső értéke) az opálosodási nyomás felett kb 5 barral.
- Innen maximum 60 mL cellatérfogatig hígítható állandó nyomáson tiszta CO₂ betáplálással az oldat ez alapján a hígíthatóság és a második tervezett összetétel meghatározható.

A /I. csoportfél feladatai:

- A számított oldószermennyiség bemérése, pipettával, de tömegre.
- A cella lezárása, termosztálása a tervezett hőmérséklete és feltöltése a meghatározott térfogaton a tervezett nyomásra.

A betöltött CO₂ mennyiségét mérik. Ehhez egy termosztált dugattyús CO₂ adagoló szivattyú áll rendelkezésre.

Az adagolószivattyút töltsék fel szén-dioxiddal és termosztálják úgy, hogy a CO₂ biztosan folyadék halmazállapotú legyen a dugattyúban (az adatok a tiszta CO₂ fázisdiagramjáról olvashatóak le). A folyadéknak lényegesen kisebb a kompresszibilitása, mint a szuperkritikus fluidumé, ezért pontosabb a mérés, ha a dugattyúban folyadék halmazállapotú a szén-dioxid.

Állítsák be a kívánt nyomást az adagolószivattyúban. Ez a nyomás legyen 10-50 barral magasabb, mint a cella tervezett nyomása.

Hozzák állandósult állapotba a feltöltőrendszert a cella szén-dioxid bevezető szelepéig. Az állandósult állapot beállt, ha az adagolószivattyú kijelzőjén a nyomás és térfogatértékek már nem változnak. Ekkor írják fel a térfogatot, a termosztálási hőmérsékletet és a szivattyú nyomását, majd kezdjék el a cella feltöltését.

A cella feltöltése során először kevés szén-dioxidot engedjenek a cellába, és húzzák előre a dugattyút (minimális cellatérfogatra). A fázisok folyamatos figyelemmel kísérése (és a megfigyelések feljegyzése) mellett töltsék fel a cellát a tervezett nyomásra, majd folyamatos szén-dioxid betáplálás mellett állítsák be az előírt térfogatot is (állandó nyomáson). Ekkor a cellaképnek homogén fázist kell mutatnia. Írják fel az adagolószivattyún leolvasható térfogatot.

A bemért szén-dioxid tömege az adagolószivattyú dugattyújának elmozdulásából (térfogatcsökkenés) számítható a termosztálási hőmérsékleten és a dugattyúban beállított nyomáson jellemző szén-dioxid sűrűséggel.

- Mérjék meg az oldat opálosodási nyomását 3 beállított hőmérsékleten. Fejenként minimum 3-3 mérési ponttal. Figyeljék meg az opálosodás jelenségét a cellatérfogot növelése közben, írják fel az opálosodáskor a cellában mérhető nyomás, hőmérséklet és térfogatértékeket. A fázisszétválás után kezdjék el csökkenteni a cellatérfogatot és írják fel a homogén fázis megjelenéséhez tartozó nyomás, hőmérséklet és térfogat adatokat (ebből számítják majd az oldatsűrűség értékeket is).

- A /II. csoportfél által a PE2000 programban ábrázolt izotermák közül válasszák ki, hogy a /II. csoport fél által tervezett mérések hőmérsékleteihez amelyek állapotegyenlet és milyen kölcsönhatási paraméterek a legjobbak. Ezek segítségével készítsék el a teljes fázisdiagramot a GPEC programban. Ismerkedjenek meg a program működésével és figyeljék meg, hogy a számított modell a vártnak megfelelő fázisviselkedést jósol-e.
- Számítsák ki, hogy a hígítás után ténylegesen milyen összetételű az oldat a cellában amivel a /II. csoportfél mér (ellenőrizték az eredeti összetétel számítását is!), moltörtben (az illékonyabb komponens a szén-dioxid). A mért adatok mindegyikéhez olvassák le (összetétel és pontos mérési hőmérséklet) a modell által számított opálosodási nyomást.

A /II. csoportfél feladatai:

- A PE2000 programba vigyék be az adott elegyre kapott irodalmi adatokat (hőmérsékletenként az összetartozó összetételeket az illékonyabb komponens, a szén-dioxid moltörtjében megadva) és az ugyancsak irodalmi kölcsönhatási paraméterekkel számoltassák ki a modellel is az izotermákat. Az összes adatot és modell eredményfüggvényt ábrázolják egy közös diagramban, mentsek le képként. A diagramot be kell adni. Válasszák ki a /I. csoport méréseire jellemző hőmérséklettartományban a legjobban illeszkedő modellt és paramétereit.
- Számítsák ki a tényleges bemérési adatok alapján a /I. csoport által mérésre kerülő oldat koncentrációját (illékonyabb komponens tömegtört és moltört).
- Készítsék el a GPEC programban a választott modellel és modellparaméterekkel a teljes fázisdiagramot és a /I. csoportfél mérési adatai (pontos hőmérsékletértékek és összetétel) kezdjék el leolvasni a modell által számított opálosodási nyomás értékeket. Ugyancsak olvassák le a homogén fázishoz a számított sűrűséget (nyomás, összetétel, hőmérséklet).
- Amikor a /I. csoportfél végzett a méréssel, végezzék el az oldat hígítását (a terveknek megfelelően, de módosításra lehet szükség a /I. csoportfél tényleges bemérése alapján).

A betöltött CO₂ mennyiségét mérjék. Ehhez egy termosztált dugattyús CO₂ adagoló szivattyú áll rendelkezésre.

Az adagológázszivattyút szükség esetén töltsék fel szén-dioxiddal és termosztálják úgy, hogy a CO₂ biztosan folyadék halmazállapotú legyen a dugattyúban (az adatok a tiszta CO₂ fázisdiagramjáról olvashatóak le). A folyadéknak lényegesen kisebb a kompresszibilitása, mint a szuperkritikus fluidumé, ezért pontosabb a mérés, ha a dugattyúban folyadék halmazállapotú a szén-dioxid.

Állítsák be a kívánt nyomást az adagológázszivattyúban. Ez a nyomás legyen 10-50 barral magasabb, mint a cella tervezett nyomása.

Hozzák állandósult állapotba a feltöltőrendszert a cella szén-dioxid bevezető szelepéig. Az állandósult állapot beállt, ha az adagológázszivattyú kijelzőjén a nyomás és térfogatértékek már

nem változnak. Ekkor írják fel a térfogatot, a termosztálási hőmérsékletet és a szivattyú nyomását, majd kezdjék el a cella további feltöltését. A cellában az oldat legyen mindig homogén! Folyamatos szén-dioxid betáplálás mellett állítsák be az előírt térfogatot is (állandó nyomáson). Írják fel az adagolószivattyún leolvasható térfogatot.

A bemért szén-dioxid tömege az adagolószivattyú dugattyújának elmozdulásából (térfogatcsökkenés) számítható a termosztálási hőmérsékleten és a dugattyúban beállított nyomáson jellemző szén-dioxid sűrűséggel.

- Mérjék meg az oldat opálosodási nyomását 3 beállított hőmérsékleten. Fejenként minimum 3-3 mérési ponttal. Figyeljék meg az opálosodás jelenségét a cellatérfogat növelése közben, írják fel az opálosodáskor a cellában mérhető nyomás, hőmérséklet és térfogatértékeket. A fázisszétválás után kezdjék el csökkenteni a cellatérfogatot és írják fel a homogén fázis megjelenéséhez tartozó nyomás, hőmérséklet és térfogat adatokat (ebből számítják majd az oldatsűrűség értékeket is).

Számítások

A számításokhoz két szoftvert, a Phase equilibria 2000 (PE2000) és a Global Phase Equilibrium Calculations (GPEC) programokat fogjuk használni. A PE program alkalmas a választott állapotegyenlettel számított elméleti görbe és a kísérleti (ismert hőmérsékleten és nyomáson a folyadék és gázfázis összetételét egyaránt megadó adatok) pontok együttes szemléltetésére. Először az irodalmi kísérleti adatokat és az adott hőmérsékletre szintén az irodalomból vett illesztett állapotegyenlet kölcsönhatási paraméterekkel számított függvényt hasonlítjuk össze. Értékeljük az eltérést illeszkedés jóságát. Ezután a jónak ítélt kölcsönhatási paraméterekkel kiszámoltatjuk a GPEC program segítségével széles nyomás – hőmérséklet tartományra a fázisegyensúlyi görbét. A GPEC program alkalmas arra is, hogy ismert összetétel és hőmérsékletre leolvashassuk a modell által számított opálosodási nyomást, amire a jegyzőkönyv elkészítéséhez szükség lesz.

Használt modellek [Kemény S., Thury É., Deák A.: Állapotegyenletek fázisegyensúlyok számítására, BME, 1991 felhasználásával]:

Az állapotegyenletekkel való számítások során a kiindulási feltétel mindig az, hogy az egyes fázisokban egyensúlyban az egyes komponensek kémiai potenciálja megegyezik. A kémiai potenciál azonban nem egy mérhető paraméter, a számítását a fugacitások segítségével végezhetjük el. A fugacitás a hőmérséklet, nyomás és a mólfrakció függvénye. A számítások során két sűrűgáz-modellen alapuló állapotegyenletet (vagy ezek egyikét) fogjuk használni. Ezek a Peng-Robinson illetve a Soave-Redlich-Kwong modellek, amelyeket az ún. van der Waals elegyítési szabály felhasználásával fogunk használni. Ezek elsősorban nem asszociálódó molekulák gőzfázisú elegyeinek és apoláris molekulák folyadékfázisú elegyeinek számítására alkalmasak, viszonylag széles nyomástartományban. A kölcsönhatási paraméterek (k_{ij} , l_{ij}) értéke többnyire hőmérsékletfüggő.

A Peng-Robinson állapotegyenlet:

$$P = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

$$a = \sum_i \sum_j a_{ij} z_i z_j$$

$$b = \sum_i \sum_j b_{ij} z_i z_j$$

ahol P a nyomás (Pa), R az egyetemes gázállandó, T a hőmérséklet (K), V a molterfogat (m^3/mol), a és b együtthatók, i és j a komponensek, z_i az i komponens molfrakciója.

A Soave-Redlich-Kwong állapotegyenlet (Redlich-Kwong állapotegyenlet Soave módosításával az $a(T)$ függvényre):

$$P = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a}{V(V + b)}$$

$$a = \sum_i \sum_j a_{ij}(T) z_i z_j$$

$$b = \sum_i \sum_j b_{ij} z_i z_j$$

$$a_{ii}(T) = 0,4274 \frac{R^2 T_C^2}{P_C} \left[1 + (0,48 + 1,57\omega - 0,176\omega^2) (1 - \sqrt{T_r}) \right]^2$$

$$\omega = -\log \frac{P(T_r = 0,7)}{P_C} - 1,0$$

ahol a fentiekben felül ω az asszimetriai faktor, T_r a redukált hőmérséklet (az aktuális és a kritikus hőmérséklet hányadosa), C index a kritikus pontbeli értéket jelzi.

és az elegyítési szabályok lehetnek pl. a van der Waals elegyítési szabályok:

$$a_{ij} = \sqrt{a_{ii} a_{jj}} (1 - k_{ij})$$

$$b_{ij} = \frac{b_{ii} + b_{jj}}{2} (1 - l_{ij})$$

A kölcsönhatási paraméterek a k_{ij} és l_{ij} , amelyeket a kísérleti fázisegyensúlyi adatokra történő illesztéssel határoznak meg.

Beadandó

A mért és számított adatok összehasonlítása és az eltérések értékelése. A PE2000 programmal készített diagram rajta jelölve a saját mérési pontok. A részleteket szükség esetén a mérésvezető a mérés során megbeszéli a csoporttal.

A jegyzőkönyv papír alapon vagy elektronikusan is beadható (sz-edit@mail.bme.hu, pdf formátum). Elektronikus beadás esetén az eredeti mérési adatokat tartalmazó mérési lapot papír alapon be kell adni, és ráírni, hogy a jegyzőkönyv beadása elektronikusan történt (az e-mail címet is jelöljék meg kérem, amelyről elküldték).

Mérési adattábla:

Szén-dioxid kritikus pont mérése (kb. 6 sor)

P (bar)	T (°C)	Mi látható?

1. Mérés

Bemért oldószer tömege (m):

Bemért szén-dioxid tömege (mCO₂):

Szivattyú

T:

P:

Kezdeti térfogat:

Térfogat a feltöltés végén:

Szén-dioxid sűrűség:

A bemért oldat összetétele

Tömegtört:

Moltört:

P (bar)	T (°C)	V (mL)	Mi látható?	Számított nyomás (bar)	Mért sűrűség (csak homogén fázis esetén!)	Számított sűrűség

Sorok száma: fejenként 6.

2. Mérés

A hígítás előtt

P:

T:

Hozzáadott szén-dioxid tömege (mCO₂):

Szivattyú

T:

P:

Kezdeti térfogat:

Térfogat a feltöltés végén:

Szén-dioxid sűrűség:

A hígított oldat összetétele

Tömegtört:

Moltört:

P (bar)	T (°C)	V (mL)	Mi látható?	Számított nyomás (bar)	Mért sűrűség (csak homogén fázis esetén!)	Számított sűrűség

Sorok száma: fejenként 6.

A szén-dioxid sűrűségét a NIST Chemistry Webbook (<http://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/CO2/c2-1-3>) adatbázisából érdemes kikeresni (fluid properties – kiválasztani a mértékegységeket, a hőmérséklet és nyomás tartományokat, majd kiírni).

Készítette: Székely Edit, 2012/2013 I. félév