

Opponensi vélemény

Nemestóthy Nándor

Membrános gázszeparáció

c. értekezéséről

Az energiaválság napjait élve méginkább előkerülnek a megújuló energiákkal kapcsolatos kutatások, jobban átérezzük azok fontosságát. A biogáz és biohidrogén hazánkban is elérhető megújuló energiaforrás lehet, hiszen a másod- és harmadgenerációs biomassza forrásaink, melyek alapjául szolgálhatnak a biogáz/biohidrogén termelésnek, jelentősek. Azonban a versenyképes, teljes technológia számos ponton még kidolgozásra, optimalizálásra vár, ilyen sarkalatos kérdés a fermentációt követő gáztisztítás. Ebben a megoldásra váró feladatban jelent nagy előrelépést a benyújtott értekezés.

A vegyiparban, de még inkább a biológia folyamatokat felhasználó ipari eljárásoknál a szeparációs műveletek és eljárások rendkívüli jelentőséggel bírnak. Nem csak az eljárás-technikai fontosságuk, a termék tisztasága, minősége szempontjából, de energetikai szempontok alapján is. Ezért nagyon időszerű Nemestóthy Nándor értekezése a membrános gázszeparációról, mert ennek az elméleti és gazdasági szempontból egyaránt releváns területnek a vizsgálatáról, lehetséges gyakorlati megvalósítható módjairól ad közre mind a tudomány, mind pedig a gazdaság számára releváns információkat. Itt jegyzem meg, hogy a szerző a Bevezetésben elsősorban a vízkezelést, vegyipart, egészségügyet, környezetvédelmet jelöli meg a lényegi, membránt alkalmazó területeknek, de Microfiltration Market Research, Ultrafiltration Membranes: Technologies and Global Markets tanulmánya alapján az élelmiszeripar piaci/technológiai részesedése mikroszűrés tekintetében 2020-ban 26,5%, vegyipar, biotechnológia esetében 14,9%, víz- és szennyvíztisztítás esetében pedig 23,1%. Ultraszűrést tekintve a víz és szennyvíztisztítás 40%, az élelmiszeripar 25% a vegyipar, petrokémia pedig csak 10%. A 10 éves előrejelzések pedig csak az élelmiszeripar területén jósolnak jelentősebb növekedést.

Az értekezés eredményei három fő tématerületre tagolhatóak: biogáz szeparáció, szén-dioxid szelektív elválasztása, biohidrogén szeparáció. A kutatási munkát számos pályázat anyagi segítségével sikerült megvalósítani, melyek között magyar és nemzetközi pályázatok valamint ipari megbízások egyaránt szerepelnek, ami előrevetíti annak a lehetőségét, hogy nem csupán elméleti megfontolásokat, modellezéseket tartalmazó értekezésre számíthatunk, hanem néhány valós, gyakorlatban is bizonyított eredményre.

Az értekezés **formai** szempontból megfelel az elvárásoknak, a dolgozat tagoltsága megfelelő, nyelvezete érthető, annak ellenére, hogy a mondatok nagyon tömörek, és nem mindig adnak elég támpontot a képzők és ragok, vagy éppen a mellékmondatok alkalmazásai. Az ábrák, képek többnyire informatívak, önmagukban is értelmezhetőek, viszont néhány esetben nem a legmegfelelőbbek. Így pl. a 3.2.4. ábra esetében (A folyadékmembránok vizsgálatához használt berendezés elvi vázolata) a pontos működés megértéséhez hiányzik a veeztékek jelöléseinek feloldása, mit jelent a folyamatos, szaggatott, ill. pontozott vonal. A 4.2.2 ábránál (55. oldal) nem tudható mit takar a V0, V1 jelölés, a 66. oldalon található 4.2.2. ábra esetében pedig erősen hiányolom a konfidencia intervallumok jelölését, ami több más ábráról is hiányzik, de itt a következtetések elfogadhatósága okán rendkívül fontos lenne. A 4.3.1 ábránál jobban, célszerűbben megválasztott jelölők megkönnyítenék az ábra áttekintését, mert pl. háromszög egyszer a nyomást, más gáznál a permeabilitást jelöli, a N₂ esetében mindkét értéket azonos jel mutatja. A rövidítések jegyzéke sokat segítené a dolgozat értelmezésében. A magyar nyelvű kifejezések használatára is dicséretesen törekszik a szerző, néhány angol nyelvterületről származó szakmai megnevezés, aminek van már magyar megfelelője, azért még itt-ott fellelhető, pl. steady-state (6. oldal).

Az értekezés **Szakirodalmi áttekintése** felöleli a témához tartozó releváns szakirodalmakat, a kezdetektől, a dolgozat beadásáig. Az idézett szócikkek nem mindegyike szerepel az Irodalomjegyzékben. Irodalmi hivatkozások közül hiányzó publikációk: 6. oldal: Mulder 1996, 76. oldal: Wang 2002.

Az irodalmi összeállítás fejezetei alapvetően megegyeznek az elvégzett munka eredményeinek bemutatásának fejezeteivel. Az idézett irodalmi adatok jól alátámasztják vagy indokolják a kutatási eredményeket, ill. azok célját indukálják. A biohidrogén energiaforrásként történő felhasználásának elemzésénél leírtakkal kapcsolatban azért megjegyezném, hogy való igaz, égetése során nem keletkezik üvegházhatású szén-dioxid, de a vízgőznek is van üvegház hatása.

Külön kiemelném, hogy a klasszikus, ill. a párhuzamosan használható szeparációs eljárásokat is részletesen ismerteti a szerző, így a membrános eljárásokkal történő összevetés egyszerűbb és egyértelműbb.

A **Kísérleti anyagok, módszerek** fejezetben a felhasznált membránok leírásánál nem található meg minden jellemző érték, így pl. a Kubota mikroszűrő lapmembrán modul esetében magának a membránnak a jellemzését hiányolom, a Durapore PVDF ultraszűrő membránál pedig a vágási értéket. Ha valóban ultraszűrő membránról van szó, bár ennek ellentmondani látszik a 0,22 µm-es pórusméret, ill. az, hogy a későbbiekben – 3.2 fejezet – már Durapor PVDF mikroszűrő membránként szerepel a támasztóréteges ionos folyadékmembrán készítésének leírásánál. A gazdag felsorolás viszont egyértelműen azt

mutatja, hogy Nemestóthy Nándor rendkívül széles skáláját használta fel a membránoknak, mind gyártó, mind alapanyag, mind pórusméret/vágási érték mind pedig konfiguráció tekintetében. Mindez már elővetíti egy igen átfogó, igényes munka bemutatást.

Berendezések és metódusok alfejezetben változó módon, kapcsolási és/vagy szerkezeti ábrán, ill. fotón, változó mélységben és alapossággal mutatja be a felhasznált és megépített berendezéseket és módszereket a szerző. A változatosság ellenére a berendezések ismertetése szakszerűen és mérnöki logikával történt.

A nagy volumenű mérési adathalmaz feldolgozásához időigényes elemzés tartozott, amelyhez a szerző korszerű analitikai műszerparkot használt, ám a statisztikai módszerek alkalmazását sok esetben hiányolom, akár magában az eredmények közzétételében, akár a módszerek leírásánál.

Az **Eredmények** fejezet első nagy témája a biogáz szeparációja. Itt a tiszta gázokkal folytatott mérésekkel indít a szerző, természetesen, majd a kétkomponensű gázelegyek szétválasztásával kapcsolatos kísérleteinek eredményeit mutatja be. Kicsit kakukktujásként egy saját tervezésű és kivitelezésű anaerob membrán bioreaktorral kapcsolatos megállapításait közli a fejezet végén.

Magának a teszteknek a végrehajtásához a kutatások megindításakor (2009/2010) még nem volt elérhető egy membrán-tesztelő berendezés, ezért Nemestóthy Nándor megtervezett és több év munkájával folyamatosan megújítva elkészített egy membrántesztelő gázszeparációs készüléket, ami véleményem szerint egy kiemelkedő teljesítmény. Azt a mérnöki találmányt is értékesnek tartom, ahogy a lehetőségekhez igazították az adatok kinyerését, vagyis az elérhető információk szerint a permeabilitást vagy Barrer-ben, vagy gázáteresztő egységben (GPU), vagy egyszerűen Lm^{-3} -ben adták meg, a membránok elérhető adatainak függvényében.

A tiszta gázokkal történő tesztelési eredmények esetében nagyon érdekes a hiszterézis említése, de az említésen túl semmi információ, adat vagy legalább hipotézis nem utalt arra, hogy miért került sorra ennek a jelenségnek az említése. A válasszal is adós maradt a szerző, vagyis a független változó értékének megközelítési iránya befolyásolja-e a függő változó értékét, mert a közölt ábráról (4.1.1. ábra) mindez nem olvasható le.

Szintén értékes mérnöki tervező munkának tartom az anaerob membrán-bioreaktorral kapcsolatos eredményeket, de ez nem kapcsolódik szervesen a gázszeparációhoz, és a nem kielégítően alapos leírás okán nem lehet tudni, hogy mi is volt az UF membrán feladata, mit választott le, miért nőtt az iszap koncentrációja, a 4.1.5 táblázatban közölt adatoknál minek a tömegére fajlagosították a gázhozamokat?

A második témakör a széndioxid kinyerése támasztóréteges, ionos-folyadékmembránok segítségével. Már folyadékmembránok elkészítése és a megfelelő ionos folyadék kiválasztása is elfogadható új tudományos eredménynek, nemzetközi szinten sem foglalkoznak ezzel túl sokan. Kérdésem, miért csak 30 °C-on végezték a teszt méréseket, hiszen a diffúzió erősen függ a hőmérséklettől is, érdekes lenne megvizsgálni, hogy az ionos folyadékok esetében ez a hatás megegyezik-e pl., a Newtoni folyadékokban mért mértékkel, vagy különbözik attól.

Nem vitatva a kapott eredményeket, de a szövegben jelzett, legnagyobb CO₂/N₂ szelektivitással rendelkező [bmim][PF₆] ionos folyadékkal készített membrán adatai sem a 4.2.1 sem a 4.2.2. táblázatban nem szerepelnek. Igaz, egy fejezettel később, a biohidrogén elválasztásánál közölt 4.3.7 táblázatban fellelhető ilyen adat, de az érték alatta marad a többi ionos folyadék szelektivitási értékének, különösen pl. a 4.2.2 táblázatban szereplő Cyphos membránok elméleti szelektivitás értékeinek, több gázpár esetében is. Miért maradtak ki az értékelésnél, ill. miért csak a Robeson f. diagramok okán kerülnek említésre ezek a folyadékok?

4.2.4. alfejezetben vázol szénsavanhidráz enzim alkalmazása a hatékonyabb folyadékmembrán működése érdekében ismét egy olyan eleme az értekezésnek, ami nagymértékben növeli annak értékét. Nem magának a biokatalizátornak a használata, hanem az a tény, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható rendkívül drága enzim helyett önállóan preparált enzimmészítményt hoztak létre, és azt sikeresen alkalmazták. Számomra ez is azt bizonyítja, hogy Nemestóthy Nándor a klasszikus, felfedező kutatás mérnöki megközelítésének elvét és gyakorlatát vallja.

Biohidrogén szeparációjával kapcsolatos eredmények bemutatása, tényszerű okfejtést követően, a H₂/N₂ elválasztással indul. A 4.3.1 és 4.3.2 ábrákon bemutatott értékek és a két modul közötti különbség meggyőző.

A H₂/CO₂ gázok szétválasztási vizsgálatánál miért nem vizsgálták a Twentei Egyetemtől kapott membránokat, hiszen a Martimid jelű, poliimid alapú membránt tartalmazó modul elméleti szelektivitási értéke jobb, mint az itt bemutatott japán UBE NM-B01A kompozit, ami szintén poliimid anyagú.

Mivel sok kísérlet egy-egy kezdeti feltételezés bizonyítására épül, ezért talán érthető, hogy miért nincs minden eredmény bemutatásánál statisztikai értékelés/kísérletterv. A H₂/CO₂ szeparációjánál egy 3 szintű teljes faktoriális kísérleti terv alapján elvégzett vizsgálatokat mutat be Nemestóthy Nándor. Az eredményeket bemutató ábrák igen beszédesek és meggyőzőek, ahogy az eredmények kifejtése is, de egy Pareto diagram tovább növelte volna a bizonyítás erejét és a faktorok fontosságának átláthatóságát.

Izgalmas összehasonlítási lehetőséget kínál a H₂/CO₂ gázok szétválasztásánál, hogy más típusú, szilikongumi anyagú kapilláris membránt ill. egy mikropórusos zeolit membránt is megvizsgált Nemestóthy Nándor. A zeolit membrános kísérletet bemutató 4.3.9 ábra alapján számomra nem nyilvánvaló a szerző által említett H₂ koncentráció csökkenés a retentátumban, de még ha azt közel állandónak is vesszük, akkor is „fura viselkedést” mutat a rendszer. Anyagmérleg számítást végeztek?

A 4.3.5 fejezetben vázolt gázszeparációs membrán bioreaktor kialakításának koncepciója ismét a szerző problémamegoldásának mérnöki megközelítését, az elmélet és a gyakorlat összekapcsolására vonatkozó törekvését, a feltárt elméleti tudás gyakorlati alkalmazására történő felhasználásának fontosságát bizonyítja.

Összefoglalva, Nemestóthy Nándor értekezése azt bizonyítja, hogy a PhD-fokozat megszerzése óta nemzetközileg is jelentős kutatási eredményeket ért el a membrános gázszeparáció elméleti kutatásának és gyakorlati alkalmazásának területén. A doktori disszertáció hiteles adatokat tartalmaz, melyek a Jelölt kiváló szakmai felkészültségről, alapos és innovatív, mérnöki szemléletű munkájáról tesznek tanúságot.

Nemestóthy Nándor a téziseket az értekezés tagolásának megfelelően 3 csoportban, és 17 pontban mutatja be. Az új tudományos eredmények helytálló megfogalmazása, különösen ilyen nagy mennyiségű munka esetében, nem egyszerű feladat, és sajnos nem is sikerült maradéktalanul megfelelni a hagyományos elvárásoknak, hiszen a klasszikus tézispont nem tartalmaz kísérleti előzményeket, százalékokat, szándékot, csak a lényeges tudományos megállapítást, rávilágítva a nemzetközi szinten is nagy érdeklődésre számító eredményekre. Több esetben szerencsésebb lett volna összevonni tézispontokat, pl. a II. CO₂ elválasztása pontban a C és D pontot.

A tézisek valamennyi pontjában leírtakat új tudományos eredménynek elfogadom. A dolgozatot nyilvános vitára alkalmasnak tartom.

Szeged, 2023. április 11.



Hodúr Cecilia

az MTA doktora

