

Dr. Zseni Anikó opponensi véleménye Pitás Viktória doktorandusz „Az eleveniszapos szennyvíztisztítás adaptációs képességének vizsgálata ipari szennyvizek tisztítása során” című PhD-értekezéséről

Pitás Viktória doktorjelölt „Az eleveniszapos szennyvíztisztítás adaptációs képességének vizsgálata ipari szennyvizek tisztítása során” című doktori értekezésében az eleveniszapos szennyvíztisztítás ipari szennyvizekhez történő adaptációját vizsgálja két különböző szennyvízre vonatkozóan. Munkája részeként egyrészt szakirodalmi áttekintést nyújt az eleveniszapos szennyvíztisztítási rendszerről és az ipari szennyvizek tisztításáról a tématerületéhez kapcsolódóan, másrészt bemutatja és elemzi a kétféle szennyvízzel végzett kísérleti munkáinak eredményét: egy gáztisztítási eljárások során használt vegyi anyag biológiai bontásának lehetőségét, valamint teljes üzemi méretű, kokszolói szennyvizek tisztítását végző eleveniszapos technológiában a tisztított szennyvíz kémiai oxigénigény csökkentésének lehetőségeit és korlátait. A doktorjelölt tudományos eredményeit 7 tézispontban (I.1, I.2, II., III., IV.1, IV.2, V.) sorolja fel.

• Az értekezés témájának újszerűsége, aktualitása, tudományos és társadalmi jelentősége

Az értekezés fő témája az eleveniszapos szennyvíztisztítási rendszer adaptációjának vizsgálata kétféle ipari szennyvízre vonatkozóan. Az eleveniszapos tisztítási technológia ugyan régóta ismert és kutatott, azonban a doktorjelölt ezen belül a technológia egyik korlátjának is tekinthető szeletében, nevezetesen a biológiailag nem bontható szennyezőanyagok témájában mélyed el, azt kutatva, hogy az eleveniszapos rendszer életközösségeinek adaptációjával bonthatóvá válnak-e az „átlagos” (nem adaptálódott) életközösségek számára egyébként bonthatatlan vegyületek.

A témaválasztás aktuális és környezetvédelmi, technológiai és tudományos szempontból egyaránt jelentős. Az ipari eredetű, többféle szerves szennyezőanyagot tartalmazó szennyvizek kezelése kiemelt környezetvédelmi kihívás, mivel ezek a hagyományos biológiai módszerekkel csak korlátozottan, vagy hosszú alkalmazkodási idő után bonthatók. Az eleveniszapos szennyvíztisztítás több mint száz éve alkalmazott, széles körben elterjedt technológia, amelynek egyik legfontosabb sajátossága a mikrobiális közösségek alkalmazkodóképessége. A dolgozat ennek az adaptációs képességnek a mélyebb megértésére irányul, fő kérdésként azt vizsgálva, hogy milyen mértékben képes az eleveniszapos rendszer alkalmazkodni az olyan szennyezőanyagokhoz, amelyeket biológiailag nehezen bonthatónak vagy nem bonthatónak tekintünk. A kutatás különösen értékes abból a szempontból, hogy nem csupán egy adott szennyvíztisztítási technológia hatékonyságának vizsgálatára törekszik, hanem azt is elemzi, hogy milyen feltételek mellett képes az eleveniszap egy kezdetben nehezen bonthatónak tekintett ipari eredetű szennyezőanyaghoz alkalmazkodni, illetve milyen esetekben éri el a technológia teljesítményének korlátait. Ez a megközelítés túlmutat egy egyszerű technológiai optimalizálási feladaton, és alapvető tudományos kérdéseket is érint a mikrobiális ökoszisztémák működésével kapcsolatban.

Az ipari szennyvizek kezelése a vízvédelem, a fenntartható ipari működés és a körforgásos gazdaság szempontjából is kiemelt jelentőségű. A tisztított szennyvíz minőségével kapcsolatos környezetvédelmi követelmények miatt különösen fontos annak feltárása, hogy a meglévő technológiák milyen határok között alkalmazhatók, és mikor szükséges kiegészítő kezelési eljárások alkalmazása.

A gáztisztítási eljárások során használt aktivált N-metil-dietanolamin (aMDEA) tartalmú szennyvízáram vizsgálatára piaci megkeresést követően került sor, és a kokszolói szennyvizek tisztíthatóságának vizsgálata is valós gyakorlati problémára keresi a választ. Ezáltal a munka eredményei a gyakorlatban közvetlenül hasznosíthatók, ami növeli a doktorjelölt kutatásának tudományos és társadalmi jelentőségét is. Eredményei gyakorlati ipari problémák megoldására alkalmazhatók, és hozzájárulhatnak költséghatékonyabb, kisebb környezeti terheléssel járó szennyvíztisztítási rendszerek kialakításához.

A gáztisztítási eljárások során használt N-metil-dietanol-amin (MDEA) aerob biodegradációjával kapcsolatos kutatások igen csekély száma miatt (a doktorjelölt egy publikációt talált a témában) a kutatás ezen része teljesen hiánypótló és unikális a tudományban is.

- **A szakirodalom feldolgozásának színvonala**

A dolgozat 152 számozott szakirodalmi hivatkozást tartalmaz. A hivatkozott szakirodalmak közel 90%-a angol nyelvű, többsége 15 éven belüli. Számos, a témában releváns rangos szakfolyóirat cikke feldolgozásra került. A feldolgozott irodalom mennyisége és minősége megfelelő, a témához kapcsolódó legújabb kutatási eredmények és beépítésre kerültek. A dolgozat 2. fejezete 28 oldalon keresztül mutatja be az irodalmi hátteret. A szakirodalmi áttekintés megfelelő terjedelmű és jól felépített. A feldolgozása alapos, színvonalas, részletes, kiterjed a dolgozat által érintett témák mindegyikére.

- **Tartalmazza-e a feldolgozás a témával összefüggő fontosabb tudományos előzményeket?**

Az irodalmi feldolgozás a választott témához és a doktorjelölt által alkalmazott vizsgálati módszerekhez jól köthető, nem elkalandozó, tartalmazza a fontosabb tudományos előzményeket. A doktorjelölt bemutatja az eleveniszapos szennyvíztisztítás alapjait és optimális körülményeit, a mikroorganizmusok szerepét, az adaptáció folyamatát, és az ipari szennyvizek kezelésének lehetőségeit, kitérve a jogi aspektusokra is. Bemutatásra kerülnek az eleveniszapos szennyvíztisztítás kiváltására alkalmas megoldások és a kokszolói szennyvizek jellemzői is.

- **Elemző módon, kritikailag dolgozta-e fel a jelölt a téma irodalmát?**

A téma irodalmának feldolgozása többnyire leíró jellegű, ám annak elemző feldolgozása is megtörténik. Utóbbira példák: a technológia jóságát befolyásoló alap és származtatott paramétereket bemutatása (2.1.2 fejezet); az ipari szennyvizek kezelési lehetőségeit csoportosítva bemutató 2.4.3 fejezet; és különösen azon belül a 2.4.3.4 Összehasonlítás fejezet és annak 4. és 5. táblázata az ipari szennyvizek kezelésének előnyeiről és hátrányairól; a kokszolói szennyvizek jellegzetességét és kezelési lehetőségeit bemutató 2.5 fejezet és annak 6. és 7. táblázata. Kiemelendő, hogy a dolgozat megfelelő kritikai szemlélettel mutatja be az eleveniszapos rendszer alkalmazhatóságát: nem csupán a technológia előnyei, hanem annak korlátai is bemutatásra kerülnek.

- **A kutatási célok megfogalmazásakor támaszkodott-e a jelölt a már ismert tudományos eredményekre?**

A doktorjelölt az 1. Bevezetés és célkitűzés című, szűk egy oldal terjedelmű fejezet 3-4-5. bekezdésében fogalmazza meg kutatási céljait. Az előbíráló eredményeként ez a rész bővítésre került, és tartalmaz utalást a korábbi tudományos eredményekre, pontosabban inkább azok hiányára. A célkitűzések csak részben támaszkodnak a korábbi tudományos eredményekre, inkább gyakorlati technológiai kérdésekből indulnak ki.

- **A kísérleti módszerek helyessége: Alkalmas-e a választott módszer a célokban megfogalmazottak vizsgálatára?**

A doktori kutatás során választott módszerek alkalmasak a téma vizsgálatára, úgymint a gáztisztítási eljárások során használt N-metil-dietanolamin (aMDEA) és a kokszolói szennyvizek eleveniszapos rendszerben történő tisztítási hatékonyságának vizsgálatára.

A választott kísérleti módszereket a 3. Anyag és módszer fejezetben ismerteti, ezen belül 8 oldalban a 3.3 Vizsgálati módszerek és a 3.4 Alkalmazott laboratóriumi eljárások fejezetekben. Ezen felül közel 8 oldalban a 4.1.2. A vizsgált anyag bonthatósága hosszú távú bonthatósági mérések eredménye alapján című fejezet is tartalmaz módszertani leírást. Az alkalmazott módszereket részletesen, megfelelően magyarázva, ábrákkal illusztrálva és szakirodalommal alátámasztva mutatja be.

- **A munka során alkalmazott vizsgálati módszerek korszerűsége, megbízhatósága**

Az alkalmazott laboratóriumi és számítási módszerek korszerűek, megbízhatóak. A doktorjelölt minden esetben vagy pontos leírás ad (pl. a saját kísérletek berendezéseinek és a vizsgálat lefolytatásának pontos menete, paraméterei), vagy megadja a használt eljárásra vonatkozó szabványt. Többéle laboratóriumi vizsgálatot végez: klasszikus vízkémiai paraméterek meghatározása, oxigénfelvételi sebesség mérés, gázkromatográfia-tömegspektrometria mérések, génszekvenálás. Az alkalmazott laboratóriumi eljárások közé tartoznak a membránszűrés, az inert KOI mérés és a fizikai-kémiai utókezelési módszerek is. A doktorjelölt a gépi tanulási módszerét alkalmazza a tisztított víz KOI értékét meghatározó paraméterek azonosítására, amelynek részletes bemutatása a 3.3.5. fejezetben történik meg. A laboratóriumi vizsgálatok az adaptációs folyamat kontrollált nyomon követhetőségét, a nagyüzemi adatok elemzése pedig az eredmények gyakorlati relevanciáját biztosították.

- **A kutatási eredmények feldolgozásának színvonala, az eredmények matematikai-statisztikai értékelése**

Az eredmények feldolgozása magas színvonalú. A doktorjelölt a kutatási eredményeit alaposan dolgozza fel, az eredményeket táblázatosan, grafikusán és szövegszerűen is bemutatja. A nagyobb számosságú eredmények adatainak közlésekor min., max., átlag, szórás értéket is megad. Külön pozitívum, hogy a 6 évnyi adatot tartalmazó nagy adathalmazokat gépi tanulási módszerekkel dolgozza fel: a tisztított víz kémiai oxigénigényét meghatározó paraméterek közül a befolyó KOI, a térfogati KOI terhelés és a fajlagos iszapterhelés hatását három módszerrel (Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Random Forest és Gradient Boosting) vizsgálta Python környezetben, a scikit-learn, xgboost és lightgbm könyvtárak alkalmazásával.

- **Az eredményekből levont következtetések helytállósága**

A doktorjelölt megfelelően értelmezi az adatokat, és helyes következtetéseket von le az eredményeiből.

- **Összeveti-e a jelölt saját eredményeit az irodalommal (diszkusszió)?**

A doktorjelölt a saját eredményeit részben összeveti az irodalommal. A gáztisztítás során keletkező aMDEA tartalmú szennyvízzel folytatott kísérleteinek eredményét (4.1. fejezet) objektív okok miatt nem tudja összevetni az irodalommal, hiszen ez a kísérlet unikális és úttörő. A kokszolói szennyvizekkel kapcsolatos kísérleteinek eredményeit viszont már módjában állt összehasonlítani a hasonló kutatások eredményeivel, ld. 4.2.1 Szűrési kísérletek fejezet (2 szakirodalommal történő összevetés), 4.2.4.1 Kvalitatív vizsgálatok eredményei (2

szakirodalommal történő összevetés), 4.2.9 A mikrobiális közösségek változásai (22 szakirodalommal történő összevetés). Ennek alapján megállapítható, hogy a doktorjelölt a saját eredményeit megfelelően helyezi el a nemzetközi kutatási háttérben.

• **A jelöltnek az értekezéssel összefüggő publikációs tevékenysége**

A doktorjelöltnek a dolgozat végén bemutatott publikációs listája alapján 7 db külföldi folyóiratban megjelent cikke, 19 db hazai folyóiratban megjelent cikke (ezek közül 4 db angol nyelven), 10 db konferencia részvétele csak kivonatos megjelenéssel (ezek közül 5 angol nyelven) és 15 db konferencia részvétele teljes szövegű megjelenéssel (ezek közül 1 angol nyelven) van. Ezek mindegyike kapcsolódik a szennyvíztisztításhoz, azonban jelentős részük nem kapcsolódik közvetlenül a doktori kutatási témához – ez azonban értéküket természetesen nem csökkenti. A téziseihez közvetlenül kapcsolódóan 3 külföldi folyóiratcikket jelöl meg a doktorjelölt.

• **Tartalmaz-e az értekezés új tudományos eredményeket? A jelölt mely eredményeit ismeri el a bíráló új eredménynek?**

Az értekezés számos új tudományos eredményt tartalmaz. Ezek a tézispontokban is megjelennek. A tézispontokban leírtakat új tudományos eredményeknek ismerem el. Az új tudományos eredmények összegezve az alábbiak:

- A gáztisztítási eljárások során használt aktivált N-metil-dietanolamin (aMDEA) tartalmú szennyvíz eleveniszapos tisztítási technológiával történő kísérleteinek megállapításai:
 - a nem adaptálódott eleveniszap számára való bonthatatlanságának igazolása (Tézis I.1)
 - az eleveniszap adaptációs képességének igazolása (Tézis I.1)
 - az adaptáció utáni tisztítási eredmények a szervesanyag-tartalom csökkentésére vonatkozóan (Tézis I.1)
 - az aMDEA tartalmú szennyvíz nitrifikációt nem gátló hatásának kimutatása (Tézis I.2).
- A kokszolói szennyvíz eleveniszapos tisztítási technológiával történő vizsgálatainak megállapításai:
 - Az eleveniszapos kokszolói szennyvíztisztítás felső terhelési küszöbértéke (Tézis II.)
 - A terhelési küszöbérték felett megvalósítható elfolyó KOI koncentrációk (Tézis II.)
 - Az eleveniszapos kokszolói szennyvíztisztítás tervezési értékei és az ehhez kapcsolódó elfolyó KOI koncentrációk (Tézis III.)
 - Az eleveniszapos kokszolói szennyvíz mikroszűrőssel és ultraszűrőssel való tisztításának kísérleti eredményei (Tézis IV.1.)
 - Az eleveniszapos kokszolói szennyvíz hidraulikai tartózkodási idő növelésével végzett tisztításának kísérleti eredményei (Tézis IV.2.)
 - A kokszolói szennyvíz fizikai-kémiai utókezelésére vonatkozó kísérletek eredményei (Tézis V.)

(Kis zárójeles megjegyzés: a II. és III. tézishez megjelölt fejezetszámokba elütés csúszott.)

• **A dolgozat szerkezeti felépítése, tagoltsága**

A dolgozat a nem számozott absztrakton, köszönetnyilvánításon, jegyzékeken és mellékleten kívül 5 fő fejezet tartalmaz. A 2-3-4. fejezet ezen belül első-, másod- és harmadrendű, az 5. fejezet elsőrendű alfejezetekre tagolódik, a 3. fejezetben pedig ötödrendű alfejezetek is megjelennek.

Az 1. Bevezetés és célkitűzés fejezet mindössze egy oldal, és ebbe került beépítésre a célkitűzések megfogalmazása.

A 2. fejezet tartalmazza a szakirodalmi feldolgozások jelentős részét, 28 oldalban, 5 elsőrendű alfejezetre és azok alsóbb rendű fejezeteire tagolva.

A 3. fejezet 16 oldalban, 4 elsőrendű alfejezetben és azok alsóbb rendű fejezeteiben mutatja be a vizsgált szennyvizeket, a vizsgált technológiákat és eljárásokat, az alkalmazott vizsgálati módszereket, az alkalmazott laboratóriumi eljárásokat.

A 4. fejezet mutatja be az elért eredményeket, 34 oldalban, 2 elsőrendű, és azokon belül alsóbbrendű alfejezetekre bontva. A 4.1. fejezet a gáztisztítási szennyvíz biológiai bonthatóságával kapcsolatos vizsgálatok eredményeit mutatja be és elemzi 9 oldalban, több alfejezetre osztva. A 4.2. fejezet a kokszolói szennyvíz eleveniszapos tisztításával kapcsolatos vizsgálatának eredményeit mutatja be és elemzi 25 oldalban, több alfejezetre osztva.

Az 5. Összefoglalás fejezet két alfejezetre bontva (a kétféle szennyvíz vonatkozásában), másfél oldalban foglalja össze a kutatást.

A dolgozat szerkezete, tagoltsága, arányai megfelelőek, az olvasó számára a kutatás menete és az eredmények bemutatása, elemzése, értékelése jól követhető.

- **A dolgozat táblázatai, ábrái egyértelműek, világosak-e?**

A dolgozat 40 (pontosabban 39, lásd alább) táblázatot és 28 ábrát (köztük több fényképet) tartalmaz, ezek mindegyike megfelelően számozott, címmel ellátott, és mindegyikre történik utalás a szövegben is. A dolgozatban szereplő táblázatok, ábrák segítik az olvasót a doktorjelölt által mért és számított eredmények bemutatásakor és értékelésekor. Nyolc (pontosabban hét, lásd alább) táblázat található a szakirodalmi áttekintés részben is, segítve a megértést és bemutatva a témában korábban elért eredményeket. A táblázatok, ábrák követhetőek, jelmagyarázatuk világos, egyértelmű. A 13. oldalon lévő táblázatok jegyzéke csak 39 táblázatot tartalmaz, szemben a dolgozatban számozottként megjelenő 40 táblázattal: az elcsúszás a 4. táblázatnál következik be, mivel a két oldalas táblázat külön számot kap a 38. és a 39. oldalon, míg a táblázatok jegyzékében egy számon szerepel (4. táblázat).

- **Az irodalmi hivatkozások szabályosak-e?**

A dolgozat számozással hivatkozik a felhasznált irodalmakra, a hivatkozások szabályosak, egyértelműen beazonosíthatók. Az Irodalomjegyzékben azonban több tétel esetében a szerzők a vezetéknéve nincs feltüntetve (csak egy betűvel rövidítve), csak a keresztnéve (lásd például [19], [37], [39], [43], [44], [48], [51], [53], [55], részben [93], [136]).

- **A dolgozat stílusa**

A dolgozat stílusa, szövegezése és szakszóhasználata megfelel a tudományos követelményeknek, a mondatok megfogalmazása igényes, nyelvtanilag helyes, mindeközben végig közérthető és olvasmányos.

- **A dolgozat külső megjelenése**

A dolgozat szerkesztése során a doktorjelölt egységes stílusokat alkalmaz, a dolgozat formázása megfelelő. A szöveg áttekinthető, a táblázatok és ábrák jól tagolják a szöveget és méretezésük is megfelelő.

Összefoglalva, a doktori dolgozat témaválasztását kiválónak tartom, az irodalomkutatás alapos, az elvégzett munka (laboratóriumi mérések, számolások) során a doktorjelölt számos új kutatási eredményre tett szert. A doktorjelölt értékes, önálló kutatómunkán alapuló, jelentős gyakorlati és tudományos eredményeket tartalmazó disszertációt készített az ipari szennyvizek eleveniszapos kezelésének területén, korszerű módszerek alkalmazásával, helytálló következtetések levonásával.

Fentiek alapján Pitás Viktória doktorjelölt „Az eleveniszapos szennyvíztisztítás adaptációs képességének vizsgálata ipari szennyvizek tisztítása során” című értekezését elfogadásra javaslom.

Bírálati kérdések:

1. Mi alapján választotta ki az aMDEA tartalmú szennyvízzel kapcsolatos laboratóriumi vizsgálatban alkalmazott reaktorkialakítást és üzemeltetési körülményeket? Mennyire tükrözik ezek a laboratóriumi körülmények a valós telephelyen lévő ipari szennyvíztisztító rendszer működését?
2. Az aMDEA tartalmú szennyvízzel kapcsolatos laboratóriumi vizsgálat során mi alapján választotta ki az üzemeltetés egyes szakaszainak időtartamát (20, 40, 40, 17, 26 nap), és mit gondol, hogyan változtak volna az eredmények, ha változtak volna az egyes szakaszok időtartamai?
3. Véleménye szerint a laboratóriumi vizsgálatban az adaptáció során megfigyelt tisztítási teljesítménynövekedés milyen mértékben tulajdonítható az új mikroorganizmusok elszaporodásának (populáció szintű adaptáció: genetikai szintű módosulások, mutációk), illetve a meglévő mikroorganizmusok adaptációjának (nem-genetikai, pl. fiziológiai módosulások, enzimatiszus alkalmazkodás, megváltozott metabolikus tevékenység a meglévő genetikai potenciálon belül)?
4. A kokszolói szennyvizek kapcsán a szakirodalmi áttekintésnél terjedelmi okból nem tért ki az előkezelés lehetőségeire. Milyen előkezelési technológiák javíthatnák a kokszolói szennyvíz biológiai kezelhetőségét?
5. Az ipari szennyvizek mikrobiális közössége gyakran kisebb diverzitású, de funkcionálisan specializált a lakosági szennyvizekhez képest. A kokszolói szennyvízre vonatkozóan végzett diverzitás vizsgálatait mennyiben támasztják alá ezt az általános állítást?
6. Milyen irányban fejlesztené tovább a vizsgálatait?

Győr, 2026. június 26.

Dr. Zseni Anikó

Dr. habil. Zseni Anikó
egyetemi docens

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar
Alkalmazott Fenntarthatóság Tanszék