

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**SZENNYVÍZISZAPOK  
BIOLÓGIAI LEBONTHATÓSÁGÁNAK NÖVELÉSE  
MIKROHULLÁMÚ ELŐKEZELÉSSEL**

**Beszédes Sándor**

**Témavezető:**

**Dr. Hodúr Cecilia**  
*egyetemi tanár, PhD*

**Társ-témavezető:**

**Dr. Keszthelyi-Szabó Gábor**  
*egyetemi tanár, az MTA Doktora*



Környezettudományi Doktori Iskola  
Szegedi Tudományegyetem

Szeged

2014

# 1. KUTATÁSI TÉMA ELŐZMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A vízminőség javulásával és a tisztított szennyvíz arányának növekedésével párhuzamosan a kommunális szennyvíztisztítók és egyes ipari szennyvíztisztító létesítmények üzemeltetői egyre gyakrabban szembesülnek a keletkező szennyvíziszapok kezelésének – ártalmatlanítás, tárolás, szállítás, hasznosítás – problémájával.

Az üzemi gyakorlatban a teljes üzemeltetési költségeket tekintve, a szennyvíziszap kezelésének költségeit a szennyvízkezelés költségeivel közel azonos súllyal kell figyelembe venni, ezért a szennyvíziszap kezelés és hasznosítás a kutatás-fejlesztési munkák területén egyre nagyobb hangsúlyt kap. A szennyvíziszap hasznosítása legtöbbször a mezőgazdasági területeken komposztálás vagy anaerob fermentációs eljárások keretében történik. Az anaerob fermentáció, illetve az egyéb hasznosítás esetén ki kell emelni, hogy ezek alkalmazásával a szennyvíztisztító telepek kilépnek a csupán szennyezőanyag tisztításra koncentráló, ún. „end-of-pipe” technológiák közül.

Környezetterhelési, környezetbiztonsági, higiénia és gazdasági megfontolások alapján is célszerűnek látszik az iszapok előkezelése. A hasznosítási eljárások során egyrészt biztosítani kell, hogy a környezeti elemekkel kapcsolatba kerülő iszap patogén mikroorganizmusoktól és toxikus komponensektől mentes legyen, továbbá a lerakás vagy szállítás költségessége miatt a térfogata csökkenjen és a tárolás során a benne végbemenő mikrobiológiai és biokémiai folyamatok kockázatot ne jelentsenek, illetve a további hasznosítás hatásfoka megfelelő legyen. A lehetséges kezelési eljárások közül a termikus módszereket alkalmazzák a legszélesebb körben. A termikus kezeléseket iszapszerkezetre gyakorolt – a további hasznosítás szempontjából előnyös – hatásait már több évtizede bizonyították (Brooks, 1970; Neyens, Baeyens, 2003). A termikus kezeléseket legfontosabb célja a vízteleníthetőség javítása vagy a nedvességtartalom csökkentése, az iszapok bűzterhelésének mérséklése és a mikrobiális kockázatuk csökkentése, valamint a rothaszthatóságuk javítása.

A hagyományos hőközlési eljárások alternatívjaként az utóbbi évtizedekben egyre többen vizsgálják a mikrohullámú energiaközléses műveleteket. A mikrohullámú sugárzás a speciális hőkeltési tulajdonságai révén, továbbá a változó, nagyfrekvenciás térben létrejövő ún. nem-termikus hatások miatt egyre szélesebb körben vált felhasználhatóvá. Ezek a speciális tulajdonságok: például az anyag magbelsejében történő hőfejlődés, a hőmérsékleti és nedvesség gradiens-vektorok azonos iránya (magbelsőtől a felszíni felé), az eltérő dielektromos tulajdonságok miatt fellépő szelektív felmelegítés jelensége a többkomponensű rendszerekben, a nagy energiasűrűség miatti gyors felmelegítő képesség (Clark et al., 2000; Leadbeater, 2011) stb.

A mikrohullám széles körű felhasználása és potenciális alkalmazási lehetőségeinek kutatásai ellenére az ipari hasznosítás lehetőségeit megteremtő tapasztalatok csak kismértékben állnak rendelkezésünkre. A mikrohullámú iszapkezelésre vonatkozó szakirodalmi közlemények a rendelkezésre álló mikrohullámú témakörben megjelent publikációknak csupán néhány százalékát teszik ki. Az eddigi eredmények tekintetében megállapítható, hogy a mikrohullám az iszapok esetében intenzív nedvességelvonást tesz lehetővé, továbbá az alkalmazásával egyes komponensek (pl. hasznosítható fémek) jó hatásfokkal kinyerhetőek, valamint az anaerob fermentációt megelőzően alkalmazva a biogáz produktum növelhető. Mindezen kedvező, a kezelési költséget csökkentő, illetve a hasznosítási eljárások hatásfokát növelő hatások, a biológiai eredetű iszapok esetében az iszapban található fehérjék másodlagos- és harmadlagos térszerkezetének változása miatt bekövetkező iszappehely szerkezeti stabilitás csökkenésre vezethető vissza (Park et al., 2010; Tang et al., 2010). Másrészt a magas szénhidrát tartalmú iszapok esetében megállapították, hogy a mikrohullámú energiaközlés hatására a szénhidrátfrakciók vízdoldhatóságának növekedése a fehérjékét kb. 10-15%-al is meghaladhatja (Appels et al., 2010).

Az egyes közleményekben szereplő kezelési körülményeket és eredményeket részletesen megvizsgálva sok esetben egymásnak ellentmondó megállapítások szerepelnek. A mikrohullámú módszer alkalmazhatóságának megítélését megnehezíti, hogy a különböző típusú és geometriájú berendezésekkel, eltérő kezelési intenzitások alkalmazásával kapott eredmények, eltérő mérési metodikájú és különböző számítási módszerekkel képzett mutatók felhasználásával kerültek értékelésre és bemutatásra. Egyes szerzők a mikrohullámú teljesítmény növelése esetében a szerves anyagok vízdoldhatóságának növekedéséről (Climent et al., 2007; Appels et al., 2010) számolnak be, míg mások csökkenő tendenciákat írtak le (Park et al., 2010; Toreci et al., 2009). Nyitott kezelőedényzet használatánál, nagy kezelési teljesítmény alkalmazásakor az intenzíven párolgó felület nagymértékű nedvességvesztése az iszappelyhek részleges dehidrációjához és ennek következtében agglomerációjához vezet. Ebben az esetben még az esetlegesen a kezelés után adagolt víz sem lesz képes a szerves anyagok teljes mértékű visszaoldására (Sólyom et al., 2011).

A rendelkezésre álló mikrohullámú előkezelési eredmények és tapasztalatok szinte kivétel nélkül kommunális eredetű, biológiai tisztítási fokozatból származó, csökkent szervesanyag tartalmú és alacsony szárazanyag tartalmú iszapokra vonatkoznak. Kommunális iszapok esetében megállapították, hogy az anaerob fermentáció során a mikrohullámmal kezelt iszapok esetében a szervesanyag-eltávolítás hatékonysága jobb, mint a kezeletlen iszapok esetében (Appels et al., 2013), illetve a keletkező biogáz mennyisége növekedett (Toreci et al., 2009).

## 2. KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

Mindezek figyelembevételével, a doktori értekezésem céljaként a mikrohullámú energiaközlés hatásainak és alkalmazhatóságának vizsgálatát tűztem ki, egy, a szakirodalomban még nem teljesen feltárt területen, nevezetesen az élelmiszeripari iszapok esetében. A mikrohullámú iszapkezelés vizsgálata során, az előzetes eredményeim alapján, a szakirodalmi közleményekben szereplő magnetron teljesítmény és kezelési idő, mint műveleti paraméterek mellett, a közölt energia nagyságának és a fajlagos kezelési intenzitás mértékének, mint eljárás paramétereknek a hatását vizsgáltam.

A kísérleti munkám fontos része volt továbbá a mikrohullámú iszap-előkezelésnek az anaerob fermentáció folyamatára gyakorolt hatásainak elemzése. Az előkezelések hatékonyságának vizsgálata és összehasonlíthatósága céljából mezofil hőmérséklettartományú rothasztási próbák alkalmazásával vizsgáltam az anaerob fermentáció fajlagos biogáz-kihozatali mutatóit, az előkezelt iszapokból keletkező biogáz összetételét, illetve az anaerob lebontási folyamat dinamikáját. A téma összetettsége, a gazdasági szempontból is jelentős várható eredmények, a kutatómunka többirányú megközelítését tette szükségessé. Ennek megfelelően az alábbi rész-célkitűzésekkel éltem:

- A mikrohullámú energiaközléses eljárás szervesanyag frakciókra gyakorolt hatásának vizsgálata, összehasonlítva a hagyományos termikus kezelések hatékonyságával.
- A mikrohullámú energiaközléses eljárás hatékonyságának bizonyítása objektív paraméterek segítségével.
- A mikrohullámú energiaközlésben meghatározó műveleti- és eljárás paraméterek, - mint a kezelési idő, mikrohullámú teljesítmény-intenzitás, közölt energia, - befolyásoló szerepének vizsgálata a szerves komponensek oldhatóságában és a biológiai lebonthatóság növekedésének folyamatában.
- Az oldhatóság és a biológiai lebonthatóság mérésére szolgáló objektív mutatók kifejlesztése, amelyekkel az iszap mikrohullámú kezelési paraméterei objektíven vizsgálhatóvá tehető, és amelyek alkalmasak a folyamat modellezésére és optimalizálására.
- A mikrohullámú energiaközlés teljesítmény-intenzitástól és a közölt energia nagyságától függő hatásának vizsgálata az élelmiszeripari iszapok anaerob fermentációs folyamatára.
- Összefüggések feltárása az iszapok szervesanyag tartalmában és biológiai lebonthatóságában bekövetkező változások és a dielektromos jellemzők között.
- A mikrohullámú energiaközlési eljárás anaerob fermentációban történő előkezelésének gazdaságossági elemzése.

### 3. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A mikrohullámú iszapkezeléseket a SZTE Mérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézetében kifejlesztett mikrohullámú kezelő-mérőegységben végeztem. A berendezésbe a mikrohullámokat egy 2450 MHz üzemi frekvencián működő 700 Watt maximális teljesítménnyel rendelkező magnetron generálja. A magnetron fűtőfeszültsége a nagyfeszültségű tápegység primer oldalán elhelyezett toroid transzformátor feszültség beállításával fokozatmentesen vezérelhető.

A mikrohullámú iszap kezelési eljárás vizsgálata során a mikrohullámú teljesítmény-intenzitás (MWPL - microwave power level) és az anyaggal közölt fajlagos energia (IMWE-irradiated microwave energy) műveleti paraméterek hatását elemeztem. A két műveleti paramétert a magnetron teljesítmény ( $P_m$  [W]), a kezelt iszap tömege ( $m_{\text{iszap}}$  [g]), a kezelési idő ( $\tau$  [s]) és a szakaszos üzemű kezelések során számított százalékos sugárzási idő ( $I$  [%]) alapján határoztam meg.

A dielektromos állandó ( $\epsilon'$ ) és a dielektromos veszteségi tényező ( $\epsilon''$ ) mérésére a SZTE Folyamatmérnöki Intézete számára fejlesztett dielektrométer készüléket használtam. A berendezés mérőtápvonalához, NRVZ típusú szenzorokkal, kapcsolódó NRVD teljesítménymérő (Rohde&Schwarz, Németország) segítségével a haladó irányú ( $P_h$ ) és a visszavert teljesítmény ( $P_r$ ) mérhető, amelyből a következő összefüggéssel a dielektromos állandó számítható.

$$\epsilon' = \sqrt{\frac{P_r}{P_h}}$$

A mikrohullámú teret generáló 2450 MHz frekvenciájú magnetronból érkező sugárzás hullámkarakterisztikájának vizsgálatával - a  $\lambda/4$  távolságra elhelyezett detektorfejek villamos jeléből -fáziseltolás ( $\phi$ ) és a reflexió ( $\Gamma$ ) értékének felhasználásával a veszteségszög ( $\delta$ ) számítható, és ennek ismeretében a dielektromos veszteségi tényező értéke meghatározható.

$$\delta = \arctan\left(\frac{|\Gamma| \sin \phi}{1 - (|\Gamma| \cos \phi)}\right) - \arctan\left(\frac{|\Gamma| \sin \phi}{1 + (|\Gamma| \cos \phi)}\right)$$

$$\epsilon'' = \tan \delta \cdot \epsilon'$$

A vizsgálataim során a széntartalmú szerves anyagok mennyiségének meghatározására legtöbbször használt 5 napos biokémiai oxigénigényt (BOI<sub>5</sub>) mértem, egy hat férőhelyes, folyamatosan kevertetett rendszerű BOD Oxidirect (Lovibond) típusú respirometriás berendezéssel.

A biológiai lebontás ütemét erősen befolyásoló hőmérséklet állandó értékének ( $20\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ) biztosítására a mérőrendszert termosztát szekrénybe (TS606, WTW) helyeztem. A BOI meghatározást az APHA 5210D (American Public Health Association, Approved Standard Methods, 2001) módszernek megfelelően végeztem. A minták beoltására standardizált, szelektív, heterogén mikrobatorzseket tartalmazó BOD Seed (Cole-Parmer, USA) készítményt használtam.

A kémiai oxigénigény (KOI) mérésre HACH küvettás gyorseszteket alkalmaztam, amelyek mérési metódusa megfelel az USEPA5520D KOI mérési módszernek. A minták roncsolását termikus roncsolóban (ET 108, Lovibond) végeztem  $150^{\circ}\text{C}$ -on 2 óráig. A termikus-savas roncsolás során bekövetkező színváltozást fotometriásan mértem PC Checkit fotométerrel (Lovibond).

A szervesanyag tartalommal arányos KOI mérés során meghatároztam a teljes szervesanyag tartalmat (TCOD-total chemical oxygen demand), valamint a vízdoldható szervesanyag tartalommal arányos KOI értéket (SCOD-soluble chemical oxygen demand). A TCOD mérésnél az analizált minta a teljes iszapmátrixot tartalmazta. A SCOD mérésénél a vízdoldható fázis szeparálását 15 perces centrifugálással (MPW-350)  $32000\times g$  RCF értékkel végeztem. A centrifugálással kapott felülúszót  $0,45\ \mu\text{m}$  (Millipore) pórusméretű cellulóz-acetát alapanyagú mikroszűrőt alkalmazva fecskendőszűrővel tovább szűrtem.

A szennyvíziszapok anaerob körülmények közötti biológiai lebonthatóságát mezofil hőmérséklettartományú rothasztási tesztekkel határoztam meg. A szennyvíziszapok biogáz hozamának mérésére a WTW OxiTop-C 110 típusú 12 férőhelyes, folyamatosan kevertetett, manometrikus mérőrendszert használtam. A fermentációt  $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  hőmérsékleten végeztem, amely állandóságának biztosítására a kísérleti rendszert termosztát szekrénybe helyeztem. Az iszapminták beoltására egy kommunális szennyvíztisztító telep mezofil rothasztójának iszapját használtam. A vizsgált iszapok esetleges eltérő összetétele miatt minden rothasztási teszt előtt az iszap szuszpenziók pH-ját 7,2 értékre állítottam be.

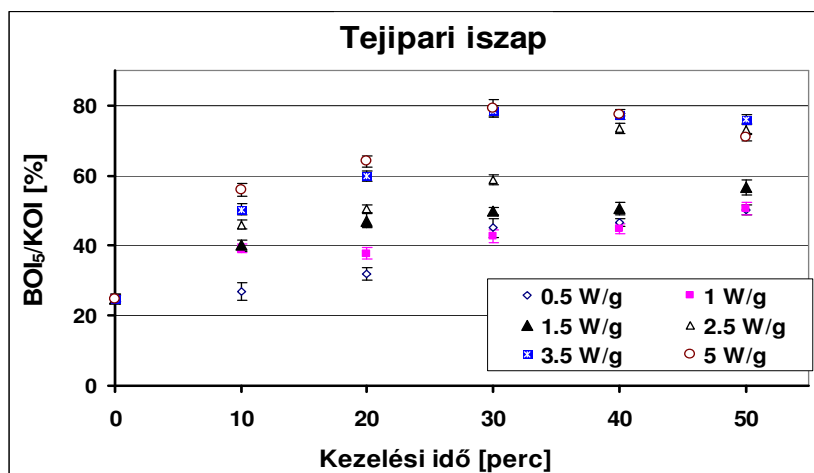
## 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

**T1) Élelmiszeripari iszapok esetében az atmoszferikus nyomáson végzett mikrohullámú kezelés, az atmoszferikus nyomáson kivitelezett, hagyományos termikus kezelésekhez képest, rövidebb műveleti időszükséglet mellett, nagyobb mértékben növeli a szervesanyagok oldhatóságát és az aerob folyamatokban lebontható vegyületek koncentrációját, amely alkalmassá teszi a módszert a biológiai iszapkezelési eljárások szervesanyag hasznosításának intenzifikálására.**

*A kémiai oxigénigény mérési módszerrel meghatározható, az összes szervesanyag tartalom belüli vízoldható összetevők arányát jelző, SCOD/TCOD paraméter a tejipari iszap esetében a kezdeti 9,7%-ról 30% fölé, húsipari iszap esetében 29%-ról 45%-ra növelhető mikrohullámú kezeléssel. Az aerob körülmények között lebontható szerves anyagok koncentrációjával arányos BOI értéke a kezeltlen mintához képest, mikrohullámú kezelésekkal a tejipari iszap esetében négyszeresére, húsipari iszap esetében közel háromszorosára növelhető.*

**T2) A mikrohullámú iszapkezelési eljárásnak, a szervesanyag frakció oldhatósága, valamint a biológiailag lebontható szerves anyagok koncentráció változása szempontjából értelmezett hatékonyságát, a mikrohullámú sugárzás behatási idején túl, a kezelt anyag egységnyi tömegére vonatkoztatott, azaz fajlagos teljesítmény-intenzitás is befolyásolja.**

*Mind a tejipari, mind a húsipari eredetű iszap esetében a szervesanyag vízoldhatóság mértékével arányos SCOD/TCOD arány növekedését, továbbá a szervesanyag tartalom belül a biológiailag lebontható vegyületek arányát jelző BOI/KOI arány változását a fajlagos mikrohullámú kezelési teljesítményintenzitás a vizsgált 0,5-5 Wg<sup>-1</sup> tartományban szignifikánsan befolyásolja.*



1. ábra: A BOI/KOI arány változása tejipari iszap kezelésekor 0,5 – 5 Wg<sup>-1</sup> között változó fajlagos teljesítmény-intenzitás mellett, a kezelési idő függvényében

**T3) Az aerob biológiai lebonthatóság jellemzésére fejlesztett biodegradálhatósági index (BDI), és a szerves anyagok vizes fázisban mérhető koncentráció változás jellemzésére fejlesztett oldhatósági index (SLI) alkalmas a mikrohullámú iszapkezelés műveleti paramétereinek hatásának objektív vizsgálatára, és azok optimalizálására.**

*Az oldhatósági index (SLI) valamint a biodegradálhatósági index (BDI) a teljes (TCOD), a vízoldható formában lévő szervesanyag tartalom (SCOD), illetve a biokémiai oxigénigény (BOD) kezdeti (0) adott időpontban (t) és maximális lebontást ( $m_{max}$ ) követően mért értékeiből számítható.*

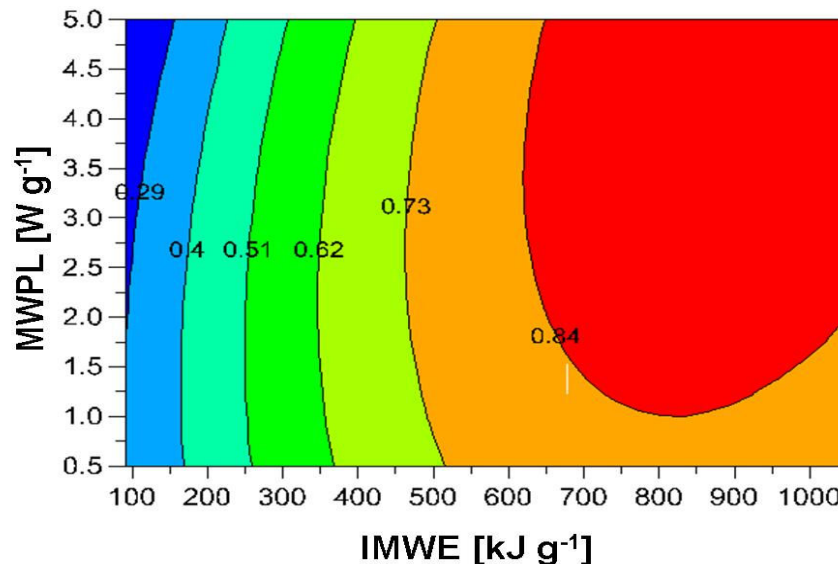
$$SLI = \frac{\left(\frac{SCOD}{TCOD}\right)_t - \left(\frac{SCOD}{TCOD}\right)_0}{\left(\frac{SCOD}{TCOD}\right)_{max} - \left(\frac{SCOD}{TCOD}\right)_0} \quad [-] \qquad BDI = \frac{\left(\frac{BOD}{SCOD}\right)_t - \left(\frac{BOD}{SCOD}\right)_0}{\left(\frac{BOD}{SCOD}\right)_{max} - \left(\frac{BOD}{SCOD}\right)_0} \quad [-]$$

*A SLI és BDI az alábbi, a fajlagos teljesítmény-intenzitást (MWPL) tekintve a 0,5-5 Wg<sup>-1</sup>, illetve az anyaggal közölt mikrohullámú energiát (IMWE) tekintve 90-1050 kJg<sup>-1</sup> tartományban érvényes modellekkel becsülhető:*

$$SLI = 0,8085 + 0,301x_1 + 0,014x_2 + 0,0706x_1x_2 - 0,237x_1^2 + 0,036x_2^2$$

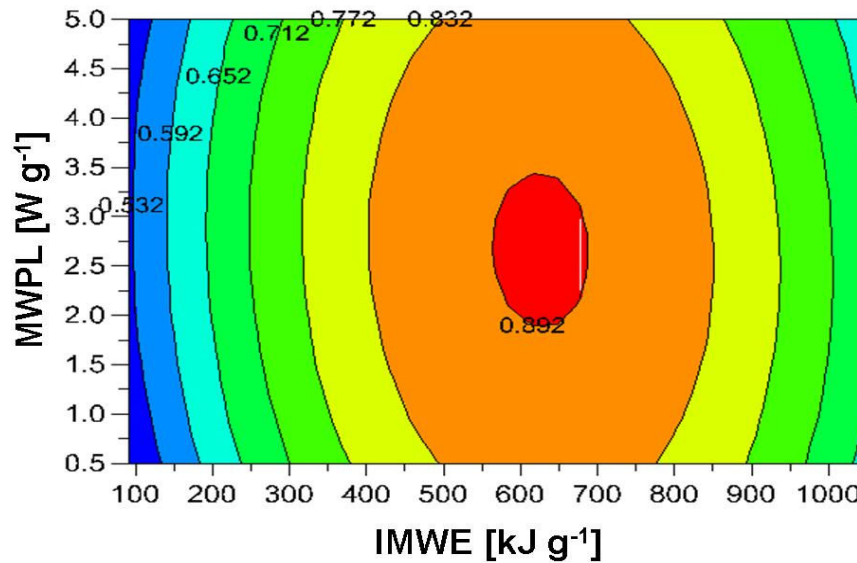
$$BDI = 0,8921 + 0,071x_1 - 0,002x_2 - 0,298x_1^2 + 0,043x_2^2$$

*Ahol  $x_1$  jelöli az IMWE,  $x_2$  pedig az MWPL paramétert.*



2. ábra: Az oldhatósági index (SLI) esetében alkotott modell által generált válaszfelület 2D metszete





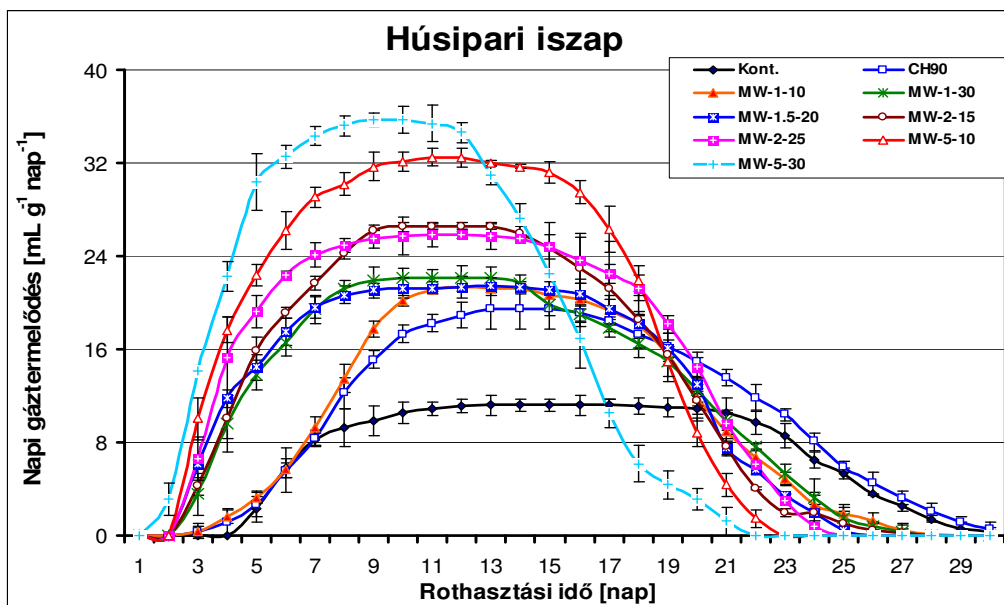
3. ábra: A biodegradálhatósági index (BDI) esetében alkotott modell által generált válaszfelület 2D metszete

**T4) A mikrohullámú energiaközlésen alapuló előkezelés az anaerob fermentáció során a biogáz-kitermelési mutatót az alkalmazott fajlagos kezelési teljesítmény-intenzitástól függő mértékben javítja, továbbá a képződő biogáz metán tartalmát növeli élelmiszeripari iszapok esetében.**

*A mikrohullámú előkezelés alkalmazásával az anaerob körülmények között nehezen bontható tejipari iszap biogáz-kitermelési mutatója a kezeletlen iszaphoz képest közel 19-szeresére, míg a húsipari iszap esetében 1,2-szeresére növelhető. A leghatékonyabbnak tekinthető mikrohullámú kezeléssel a biogáz metántartalma 25%-ot meghaladó mértékben növelhető volt mind a tejipari, mind a húsipari iszap esetében.*

**T5) A mikrohullámú iszapkondicionálási eljárás az élelmiszeripari iszapok anaerob fermentációs folyamatban való hasznosítása során alkalmas a rothasztási időszükséglet hatékony csökkentésére, továbbá az anaerob lebomlás ütemének felgyorsítása révén a biogáz képződési sebességének növelésére.**

*A mikrohullámú kezelésekkal a biogáz képződés kezdetéhez szükséges idő mezofil rothasztás esetében tejipari iszapnál 80%-al, húsipari iszapnál 75%-al rövidül le. A 30 napos fermentációs időszak alatt a biogáz képződés ötnapos lineáris felfutási szakaszából meghatározott átlagos gáztermelődési sebesség a kezeletlen iszaphoz képest, tejipari iszapnál húszszorosára, húsipari iszapnál háromszorosára növelhető mikrohullámú kezelése alkalmazásával.*



4. ábra: Húsiipari iszap biogáztermelődési üteme

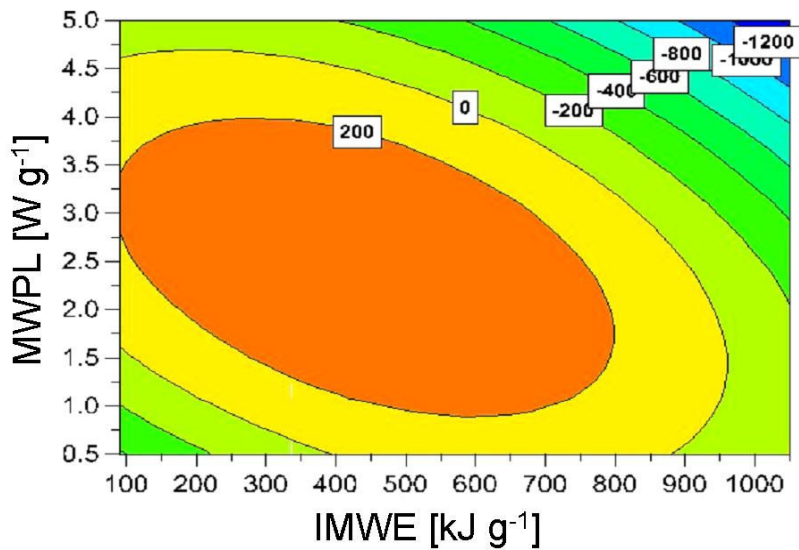
**T6) A mikrohullámú iszap kondicionálási eljárás esetében a biogázproduktum, és annak metántartalma alapján meghatározott optimális műveleti paramétertartományok nem azonosak az energetikai szempontú optimalás során meghatározottal. A rothasztást megelőző mikrohullámú kezelés hatékonyságának elemzésekor az energia-hasznosulási mutató alkalmazása szükséges.**

*Az anaerob fermentációt megelőző mikrohullámú kezelés energiahatékonysága ( $\Delta E$ ) a kezelés mikrohullámú teljesítmény-igényének ( $P_{mag}$ ) és idejének ( $\tau$ ), valamint a hatására képződő biogáz többlet ( $V_{CH_4}$ ) fűtőértékének ( $q_{égés}$ ) figyelembevételével jellemezhető.*

$$\Delta E = \frac{(q_{égés} \cdot V_{CH_4}) - (P_{mag} \cdot \tau_{kez})}{m_{iszap}} \quad [J g^{-1}]$$

*A kezelések energetikai szempontú optimalása az IMWE ( $x_1$ ) és MWPL ( $x_2$ ) műveleti paramétereket tartalmazó modell alkalmazásával végezhető.*

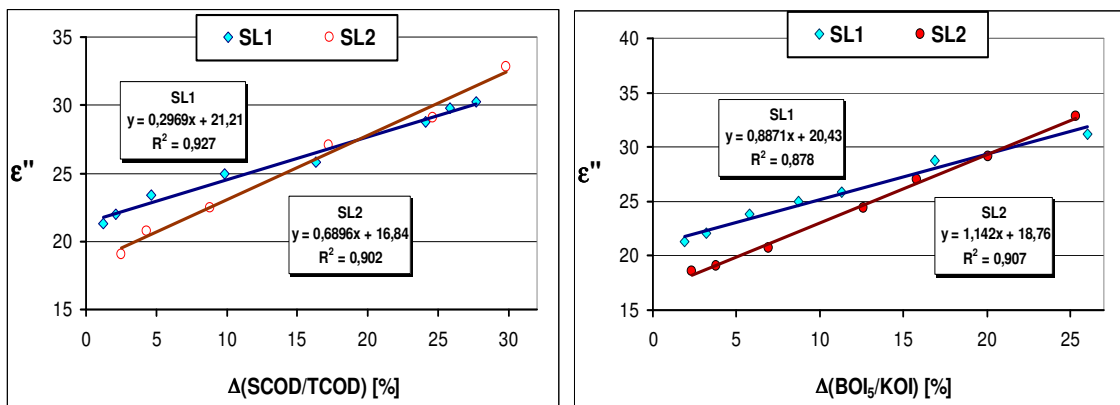
$$\Delta E = 326.12 - 27.29X_1 - 237.74X_2 - 4.017X_1^2 - 470.79X_2^2 - 385.9X_1X_2 \quad [J g^{-1}]$$



5. ábra: Az energiahatékonyságra ( $\Delta E$ ) alkotott modell által generált válaszfelület 2D metszete

**T7) A mikrohullámú hőkezelés szempontjából meghatározó dielektromos veszteségi tényező értéke az iszapok szervesanyag oldhatóságával, és biológiai lebonthatóságával összefüggésben áll. A dielektromos veszteségi tényezőnek a kezelési folyamatok során bekövetkező változásának mérésével a biológiai lebonthatóság mértékének növekedése becsülhetővé válik.**

Az iszapot alkotó szerves anyagok vízoldhatóságának változásával arányos SCOD/TCOD paraméter, valamint a biológiailag lebontható szervesanyag frakciók koncentráció változásával arányos BOI/KOI paraméter a dielektromos veszteségi tényező ( $\epsilon''$ ) értékének változásával szoros ( $R^2 > 0,9$ ; ill.  $R^2 > 0,85$ ) kapcsolatban áll.



a)

b)

6. ábra: A dielektromos veszteségi tényező ( $\epsilon''$ ) és az oldható szervesanyag arány (a) és a biológiailag lebontható szervesanyag arány (b) kapcsolata

## 5. A DOKTORI ÉRTEKEZÉS ALAPJÁT KÉPEZŐ KÖZLEMÉNYEK

- 1) Biogas production of ozone and/or microwave-pretreated canned maize production sludge**  
Beszédes S., Kertész Sz., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Ozone Science & Engineering 31(3) (2009) 257-261; IF: 1,252
- 2) Comparison of the effects of microwave irradiation with different intensities on the biodegradability of sludge from the dairy- and meat-industry**  
Beszédes S., László Zs., Horváth H. Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Bioresource Technology 102(2) (2011) 814-821; IF: 4,980
- 3) Effects of microwave pretreatments on the anaerobic digestion of food industrial sewage sludge**  
Beszédes S., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Environmental Progress & Sustainable Energy 30(3) (2011) 486-492; IF: 1,649
- 4) Microwave enhanced biodegradability of meat processing wastewater sludge**  
Beszédes S., Ludányi L., Szabó G., Hodúr C.  
Environmental Engineering and Management (ISSN: 1582-9596)  
Accepted paper (2013 aug.); IF:1,258\*  
Abstract online elérhető:  
[http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/accepted/332\\_46\\_Beszedes\\_13.pdf](http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/pdfs/accepted/332_46_Beszedes_13.pdf)
- 5) Application of response surface methodology to optimize microwave sludge conditioning for enhanced biogas production**  
Beszédes S., Ábel M., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering 9(2) (2011) 189-193 (ISSN: 1821-4487)

### Egyéb közlemények

- 1) The possibilities of bioenergy production from whey**  
Beszédes S., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Journal of Agricultural Science and Technology 4(1) (2010) 62-68 (ISSN: 1939-1250)
- 2) Berry pectins: Microwave-assisted extraction and rheological properties**  
Bélafi-Bakó K., Cserjési P., Beszédes S., Csanádi Zs., Hodúr C.  
Food and Bioprocess Technology 5(3) (2012) 1100-1105; IF: 4,115
- 3) Microwave-assisted extraction of anthocyanins from black currant marc**  
Pap N., Beszédes S., Pongracz E., Myllykoski L., Gábor M., Gyimes E., Hodúr C., Keiski R.L.  
Food and Bioprocess Technology 6(10) (2013) 2666-2674; IF: 3,126
- 4) Maximum recovery of different types of berry byproducts**  
Hodúr C., Beszédes S., Kertész Sz., László Zs., Szabó G.  
Journal on Processing and Energy in Agriculture 13(4) (2009) 312-314 (ISSN:1821-4487)
- 5) Enhanced enzymatic saccharification of agri-food solid wastes by microwave pre-treatment**  
Beszédes S., Ábel M., Szabó G., Hodúr C., László Zs.  
Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering 9(3) (2011) 453-458 (ISSN: 1821-4487)

## Konferencia előadások

- 1) **Increasing of biodegradability and digestibility of dairy sludge by microwave treatment**  
Beszédes S., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
5th International Technical Symposium on Food Processing, Monitoring Technology in Bioprocesses and Food Quality Management (Potsdam, Németország, 2009.08.31-2009.09.02) pp.: 315-323 (ISBN.978-300-028-811-1)
- 2) **Toroid-rezonátor fejlesztése szennyvíziszapok mikrohullámú kondicionálására**  
Beszédes S., Ludányi L., Koltai A., Szabó G.  
7. Magyar Szárítási Szimpózium (Gödöllő, Magyarország, 2011.04.07-2011.04.08) pp.:12-13 (ISBN: 978-963-269-212-8)
- 3) **Biogas production from food industry wastewater sludge intensified by microwave irradiation**  
Beszédes S., Ábel M., László Zs., Szabó G., Hodúr C.  
Bioenergy and Other Renewable Energy Technologies and Systems (BRETS 2011): 33 International Symposium of Section IV of CIGR (Bucuresti, Románia, 2011.06.23-2011.06.25) *Paper PS307 (8p) (ISBN 978-606-521-686-0)*
- 4) **Application of microwave toroidal cavity resonators for conditioning of food industry wastewater sludge**  
Beszédes S., Ludányi L., Veszeloyszki P., Hodúr C., Szabó G.  
ISEKI Food 2011 - Bridging Training and Research for Industry and the Wider Community: 2nd International ISEKI Food Conference (Milan, Olaszország, 2011.08.31-2011.09.02) p.170 (ISBN 978-889-059-890-6)
- 5) **Microwave treatment as a tool for enhanced waste valorisation**  
Beszédes S., Kovács-Veszeloyszky P., Ludányi L., Hodúr C., Szabó G.  
Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry, Abstracts of the II International Conference of the CIGR Hungarian National Committee. (Gödöllő, Magyarország, 2011.10.09-2011.10.15) pp.: 65-71 (ISBN 978-963-269-249-4)

## 6. A TÉZISFÜZETBEN FELHASZNÁLT SZAKIRODALMI HIVATKOZÁSOK JEGYZÉKE

- 1) Appels L., Degreve J., Van der Bruggen B., Van Impe J., Dewil R. Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilization, heavy metal release, and anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 101, 2010, 5743-5748.
- 2) Appels L., Houtmeyers S., Dereve J., Van Impe J., Dewil R. Influence of microwave pre-treatment on sludge solubilization and pilot scale semi-continuous anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 128, 2013, 598-603.
- 3) Brooks R.B. Heat treatment of sewage sludge. *Water Pollution and Control*, 69(2), 1970, 221-231.
- 4) Clark D.E., Folz D., West J.K. Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering A287*, 2000, 153-158.
- 5) Climent M., Ferrer I., Baeza M., Artola A., Vazquez F., Font F. Effects of thermal and mechanical pretreatments of secondary sludge on biogas production under thermophilic conditions. *Chemical Engineering Journal* 133, 2007, 335-342.
- 6) Leadbeater N.E. *Microwave heating as a tool for sustainable chemistry*. CRC Press, 2011, 278 p.
- 7) Neyens E., Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability. *Journal of Hazardous Materials B(98)*, 2003, 51-67.
- 8) Park W.J., Ahn J.H., Hwang S., Lee C.K. Effect of output power, target temperature, and solid concentration on the solubilization of waste activated sludge using microwave irradiation. *Bioresource Technology* 101, 2010, S13-S16.
- 9) Sólyom K., Mato RB., Perez-Elvira SI., Cocero MJ: The influence of the energy absorbed from microwave pretreatment on biogas production from secondary wastewater sludge. *Bioresource Technology* 102(23), 2011, 10849-10854.
- 10) Tang B., Yu L.F., Huang S.S., Luo J.Z., Zhuo Y. Energy efficiency of pretreating excess sewage sludge with microwave irradiation. *Bioresource Technology* 101(14), 2010, 5092-5097.
- 11) Toreci I., Kennedy K.J., Droste R.L. Evaluation of continuous mesophilic anaerobic sludge digestion after high temperature microwave pretreatment. *Water Resource* 43, 2009, 1273-1284.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

*Köszönetet mondok Témavezetőimnek és mindazoknak, akik a kutatómunkám során, illetve a doktori értekezés elkészítésében segítséget nyújtottak.*

*Köszönetemet fejezem ki a „Jedlik Ányos Doktorjelölti Ösztöndíj a Konvergencia régióban” projekt által nyújtott pénzügyi támogatásért. A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.*