

SZENNYVÍZ ÉS ISZAP SZERVESANYAGFRAKCIÓK BIOLÓGIAI HASZNOSÍTHATÓSÁGÁNAK FOKOZÁSA MIKROHULLÁMÚ ELJÁRÁSOKKAL

Beszédes Sándor¹, Jákói Zoltán¹, Lemmer Balázs¹, Papp Viktória², Vágvölgyi Andrea²,
Haranghy Laura¹, Nagy Sándor³, Hodúr Cecília¹

¹Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
H-6725 Szeged Moszkvai krt. 9

²Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar, Erdészeti-műszaki és Környezettechnikai Intézet
H-9400 Sopron Bajcsy-Zsilinszky u. 4

³Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai
Intézet
H-3515 Miskolc Egyetemváros
beszedes@mk.u-szeged.hu

Absztrakt: *A szennyvízben, illetve a szennyvíziszapban lévő szervesanyagok környezeti elemekbe való kijuttatásának mérséklése környezetvédelmi-, ezen frakciók hasznosítása - a körkörös gazdaság koncepciójának is megfelelően - a természeti erőforrásokkal való fenntartható gazdálkodás szempontjából aktuális megoldandó feladat. A szennyvíz, illetve ennek a fázis-szeparációjakor, vagy egyéb eljárásban, keletkező iszap szervesanyag frakcióinak biotranszformáción alapuló hasznosításának határfokát a szerves komponensek oldhatósága nagymértékben meghatározza. A mikrohullámú energiaközlés rövid időszükséglet mellett alkalmas a vízőldhatóság fokozására és kritikus energiaintenzitást meghaladóan alkalmazva a sejtfalak és a sejten kívüli polimerstruktúrák roncsolására, valamint egyes makromolekulák hidrolízisének elősegítésére. A kutatásaink során vizsgáltuk a mikrohullám-specifikus műveleti paraméterek hatását mind az aerob, mind az anaerob biodegradáció mértékére.*

Az eredményeink alapján megállapítható, hogy a mikrohullámú energiaközlés önmagában is alkalmas mind az aerob, mind az anaerob biológiai lebonthatóság növelésére, a szervesanyag frakciók vízőldhatóságában bekövetkező növekmény hatására. A mikrohullámú módszert kémiai módszerekkel kombinálva megállapítottuk, hogy a savas kémhatású rendszerben végzett energiaközlés elsősorban az aerob biológiai lebonthatóság, míg az energiaközlést megelőző lúg adagolás a biogáz kitermelési mutató javítása esetében hatékony. Továbbá vizsgáltuk a mikrohullámú sugárzás termikus hatásfokával is összefüggő dielektromos jellemzők, valamint az aerob és anaerob biológiai lebonthatóságot jelző indikátorok közötti kapcsolat potenciális meglétét.

Kulcsszavak: szennyvíz, iszap, mikrohullámú kezelés, dielektromos jellemzők

1. Bevezetés

A mikrohullámú energiaközlés, elsősorban a termikus hatásai következtében a szerves anyagokkal erősen terhelt szennyvíznél, vagy iszapoknál az élő sejtek sejtfalának felszakításával, a patogének pusztítása révén az ártalmatlanítás egy hatékony módszerének tekinthető (Ahn et al., 2009). A mikrohullámú sugárzás gyorsan és hatékonyan képes a nem oldott állapotban lévő részecskéket, illetve iszapok esetében a pelyhek szerkezetének felszakítására, illetve egyes esetekben – például kémiai és nagyhatékonyságú oxidációs módszerekkel kombinálva- a nagy molekulájú szerves komponensek részleges hidrolizálására (Tang et al., 2010). Ezen hatások, a nedvességtartalom belül a szabad víz arányának növelésével elősegíthetik az iszapok víztelenítését, továbbá javíthatják a későbbiekben alkalmazott biológiai

hasznosítási módszerek (pl. anaerob fermentáció, vagy komposztálás) hatékonyságát, rövidebb időszükséglet, vagy több „értékes” termék képződése mellett (Eskicioglu et al, 2006).

A nagy energiaintenzitású mikrohullámú kezeléseknél a nagyobb iszappelyhek kisebb fragmentumokra esnek szét (dezintegrálódnak) és ezek a részek az adagolt flokkulálószerrel újrapelyhesednek, azonban az ezután létrejövő részecskeméret már nagyobb, így a kisebb fajlagos felületnek, illetve a gyengébb extracelluláris polimerhálónak köszönhetően a kötött víztartalom csökkenése miatti szabad víztartalom növekedés révén a későbbi víztelenítés hatásfoka javult (Ebenezer et al., 2015). A mikrohullámú iszapkezelési eljárás lúg-adagolással kombinálva alkalmas a szervesanyagok oldhatóságának fokozására. A kombinált módszer csökkenti a mikrohullámú hőkeltés külső energia igényét, így a költségeket is, hiszen együttes alkalmazással alacsonyabb teljesítmény-intenzitású mikrohullámú sugárzással is hasonló szolubilizációs fok érhető el, mintha a mikrohullámot önállóan alkalmaznánk nagyobb teljesítményen (Jang et al., 2013). A kutatások eredményeként megállapítható, hogy a művelethez szükséges idő jelentősen lerövidíthető, valamint csökkenthető a kezelések energiaigénye a hagyományos hőközlésen alapuló termikus kezelési módszerekkel összehasonlítva. A mikrohullámú anyagkezelések kivitelezhetőek atmoszférikus körülmények között, illetve nyomás alatti (atmoszférikus forráspont feletti hőmérsékleten) eljárások alkalmazásával is. Kuglarz és munkatársai (2013) a szennyvíziszapot alacsony hőmérsékleten mikrohullámokkal kezelték, melynek során arra a következtetésre jutottak, hogy a hagyományos termikus módszert a mikrohullámú energiaközléssel összehasonlítva a forráspont alatti hőmérséklettartományban a biogáz termelődés és az iszap oldhatóvá tétele a mikrohullámokkal kezelt minták esetében energetikai szempontok alapján is hatásosabb volt.

Kommunális eredetű szennyvíziszappal végzett vizsgálatok során megállapították, hogy nőtt az iszapvízben (vízoldható fázisban mérhető) kation koncentráció, és az összes savtartalom is. Az oldható fehérje koncentráció lineáris növekedést mutatott a kezelési idő előrehaladtával egészen a forrásponti hőmérséklet eléréséig, magasabb hőmérséklet hatására sem figyeltek meg lényeges csökkenést (Tyagi et al., 2013). Az oldható szénhidrát koncentráció csökkenést csak nagy teljesítmény-intenzitású, a mikrohullámú kezelés szempontjából hosszúnak tekinthető 11-15 perces mikrohullámú sugárzás követően tapasztaltak. Növekedett továbbá az iszapvízben a lipid koncentráció is, részben a foszfolipidek fő szerkezetét adó citoplazma membrán felszakadása miatt (Eskicioglu, 2008). A sejtmembránok bomlása a protoplazmában lévő, az addig kötött állapotú enzimek felszabadításához vezet, amelyek a szerves nitrogén és foszfor vegyületek hidrolíziséért felelősek. Ez az ammónia és a foszfát felszabadulását, így a folyékony fázisban ezek koncentrációjának növekedését okozza (Lee et al., 2015). A hulladékból-energia (waste-to-energy) koncepció célkitűzéseinek megfelelően tehát a mikrohullámú kezelés jól adaptálható az energiában gazdag bio-hajtóanyagok előállítási technológiájának intenzifikálására, ilyen alkalmazásokra mind a biogáz, mind a biodizel előállítása esetében találhatóak kutatási eredmények (Chandrasekara et al., 2012).

A nagyhatékonyságú oxidációs eljárásokkal való kombináció több szempontból is előnyös lehet. A mikrohullámú sugárzás hatására az anyag lokális túlmelegedésének („hot spot”) következtében hidroxil gyökök képződhetnek. A heterogén fotokatalízis alkalmazásakor, ha azt mikrohullámú erőterben végzik, a mikrohullámú sugárzás csökkentheti az elektron-lyukpár rekombináció lehetőségét úgy, hogy elősegíti a fotonok által kiváltott elektronok átmenetét a katalizátor felületére (Cravotto et al., 2007).

A mikrohullámú sugárzás esetében – a frekvencián és a térerősségen kívül – elsősorban a dielektromos jellemzők lesznek azok, amelyek meghatározzák az anyag felmelegedési ütemét. Ez az energiaátadási mechanizmusban lévő különbség okozza a mikrohullám hagyományos hőkeltési eljárásokkal szembeni előnyét, vagyis hogy a mikrohullámnak nem felületi, hanem úgynevezett térfogati felmelegítő hatása van (Komarov et al., 2005). A dielektrikumok esetében, a mikrohullámú sugárzás okozta felmelegedés mechanizmusa visszavezethető az ionos vezetésre és/vagy a dipólusos rotációra. Az elektromágneses spektrumon belül a mikrohullámú frekvenciákon a nagy nedvességtartalmú anyagok esetében elsősorban a dipólusos polarizációs mechanizmus szerepe tekinthető meghatározónak (Brodie et al., 2014). Az utóbbi esetben a változó polaritású elektromágneses térben a molekulák vagy követik az igen gyors pólusváltást, vagy azt csak késve tudják követni, ebben az esetben energia disszipáció jön létre, amely az anyagban hőfejlődéshez vezet (Venkatesh et al., 2004). A változó polaritású elektromágneses tér

továbbá egyes apoláris tulajdonságú anyagok esetében is képes felmelegítésére, ha azokban ún. indukált dipólusokat tud létrehozni az elektronfelhő torzításával.

A dielektromos jellemzőket különböző elven működő és eltérő felépítésű mérőrendszerekkel is vizsgálhatják. A nyílt végű koaxiális szonda módszer (OCP) jelenleg az egyik legnépszerűbb technika az anyagok komplex dielektromos permittivitásnak, vagy ennek képzetes részének (dielektromos veszteségi tényező), illetve valós tagjának (dielektromos állandó) reflexiós tényező mérésén alapuló meghatározására. Ennél a módszernél a vizsgált anyag közvetlen kapcsolatban áll a mérőszennorral. Ez a mérési módszer, illetve mérőrendszer a legkevésbé érzékeny a mérési „zajokra”. A dielektromos paraméterek vizsgálata az anyagtudományokban is gyakran alkalmazott módszer. Például a polikondenzációs reakciók révén létrehozott dielektrikumokat eltérő arányban tartalmazó amorf, háromdimenziós geopolimer anyagok esetében a ZrO_2 , $BaTiO_3$ és Y_2O_3 komponensek polimermátrixba való beépülése a permittivitás változás mérésével nyomon követhető (Essaidi et al., 2017). Alkohol fermentáció során, *Saccharomyces* törzsek szuszpenziói esetében is megállapították, hogy a permittivitás értékének a fermentációs időszak alatti változása és az élő sejtszám növekedése jól korrelál (Tibayrenc et al., 2011; Kregiel et al., 2012).

2. Anyag és módszer

A vizsgálatokhoz élelmiszeripari eredetű szennyvizeket és iszapokat használtunk fel, amelyek összetétele (szárazanyag tartalom, szervesanyag tartalom, ezen belül BOI, KOI) a mintavételi időponttól függően változott. A mikrohullámú kezeléseket végrehajtottuk szakaszos (batch) kezelésekként formájában egy Labotron 500 típusú mikrohullámú berendezéssel (2450 MHz frekvencia, 250W, vagy 500W magnetron teljesítmény folyamatosan sugárzó üzemmódban), illetve egy saját fejlesztésű folytonos anyagáramú kísérleti berendezésben (teljesítmény 100-700W között fokozatmentesen változtatható 2450 MHz frekvencián). A közölt fajlagos mikrohullámú energiaintenzitást (kJ/L) a magnetron teljesítményének és az anyagtovábbításra használt perisztaltikus szivattyú térfogatáramának függvényében számítottuk. A mikrohullámú energiaközléssel kombinációban Fenton-eljárást is alkalmaztunk a szennyvizek kezelésére, amelynél a minta pH-ját 3,5-re állítottuk, a Fe^{2+} / H_2O_2 adagolási koncentrációkat 75/60 – 300/240 mg/mg arányok között változtattuk.

A dielektromos méréseket egy Rohde&Schwarz típusú vektor hálózat analízátorhoz kapcsolt, SPEAG által fejlesztett DAK 3.5 típusú nyílt végű koaxiális szenzorral végeztük 200 MHz-2400 MHz frekvenciatartományban, a szenzort 6 mm-es mélységben a mintába merítve. A dielektromos jellemzők hőmérsékletfüggése miatt a vizsgálatoknál a minta hőmérsékletének állandóságát vízfürdővel biztosítottuk. A dielektromos mérőrendszerben minden mérést (dielektromos állandó, veszteségi tényező, veszteségszög) 90 mérés átlagaként adtuk meg.

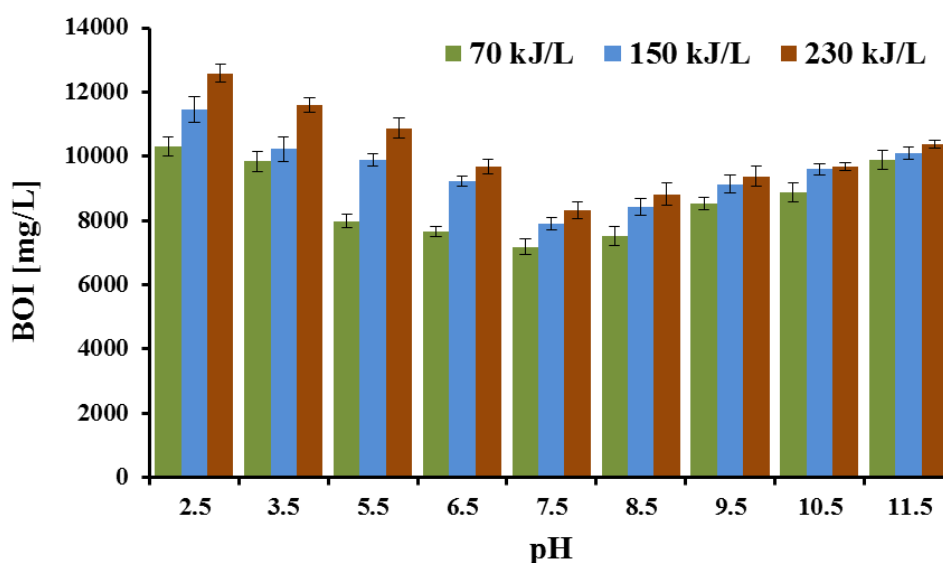
A kémiai oxigénigényt (KOI) bikromátos tesztküvetekkel, fotometriás módszerrel mértük. Az aerob körülmények közötti biológiai lebonthatóságot az 5 napos biokémiai oxigénigény (BOI) méréssel határoztuk meg, 20°C-on termosztált körülmények között, folyamatosan kevertetett reaktorokban, BOD Oxidirect respirometrikus elven működő mérőrendszerrel. Az összehasonlíthatóság érdekében valamennyi mintát heterogén, szelektált aerob mikroorganizmusokat tartalmazó készítménnyel (BOD Seed, Cole-Parmer, US) oltottuk be.

Az anaerob biológiai lebonthatóság vizsgálatára 30 napos időtartamú batch, mezofil hőmérséklettartományú rothasztási tesztekkel végeztünk 37°C-on termosztált körülmények között, folyamatosan kevertetett reaktoredényzetben. A gáztermelődési ütemet OxitopOC barometrikus mérőrendszerrel követtük nyomon, a keletkező biogáz térfogatát a nyomásnövekedésből számítottuk. A kontroll és kezelt minták beoltására egy üzemelő, ipari méretű mezofil iszaprothasztóból származó iszapot használtunk 10 m% koncentrációban, amelyet az élelmiszeripari iszapokhoz és szennyvízhez előzetesen 10 napig adaptáltunk.

3.Eredmények és értékelésük

A kísérletek során először folytonos anyagáramlású mikrohullámú kezeléseket végeztünk tejipari eredetű szennyvízből keletkezett iszap esetében. A kezeléseknél a magnetron teljesítményének és az iszap átáramlási térfogatáramának függvényében változtattuk a közölt fajlagos mikrohullámú (MW) energiaintenzitást.

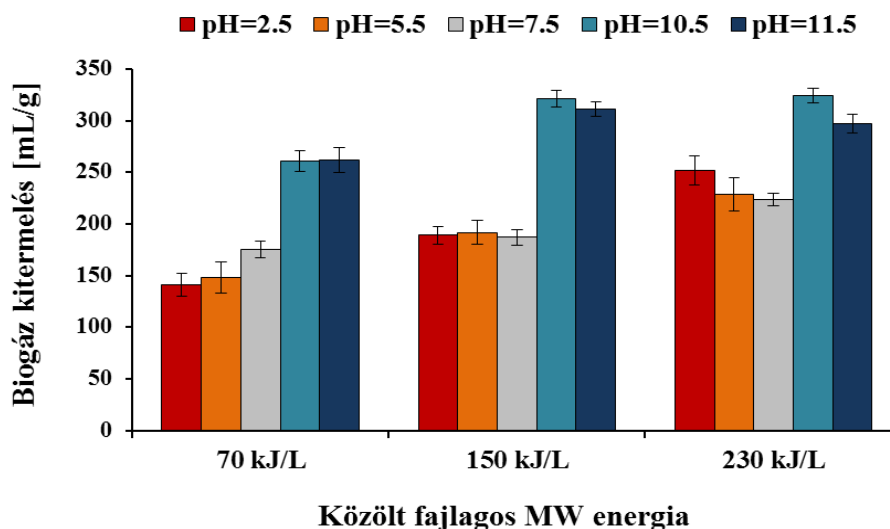
A kísérleteket elvégeztük semleges közeli, valamint savas és lúgos kémhatásra beállított iszapmintákkal is. Az aerob körülmények közötti biológiai lebonthatósággal arányos biokémiai oxigénigény (BOI), kezeléseket követően 5 napos lebontási folyamatban meghatározott, értékeit tekintve megállapítható, hogy mind a mikrohullámú kezelések fajlagos energiaintenzitása, mind az iszap kémhatása befolyásolja a biológiailag lebontható formába kerülő szerves komponensek koncentrációját. Az 1. ábrán látható módon a lúg adagolása esetén a mikrohullámú energia mértékének változása, ugyanazon pH-ra beállított minták esetében, kisebb hatást gyakorolt, mint az tapasztalható volt a savadagolással kombinált mikrohullámú kezeléseknél.



1. ábra. Tejipari iszap biokémiai oxigénigénye a kezeléseket követően

Összességében megállapítható, hogy a mikrohullámú kezelések során az iszap eredeti, semleges közeli pH-jának mind savas, mind lúgos kémhatás irányába történő megváltoztatása növeli a BOI értékét, azonban az aerob biológiai lebonthatóság mértékének fokozása szempontjából a savas kémhatású minták mikrohullámú energiaközléssel végzett kezelése tekinthető hatékonyabbnak. A pH=2,5-5,5 tartományban a 150 kJ/L fajlagos energiaintenzitású mikrohullámú kezelésekkal a tejipari iszap eredeti 4120 ± 38 mg/L biokémiai oxigénigény koncentrációja 10000 mg/L érték fölé volt növelhető.

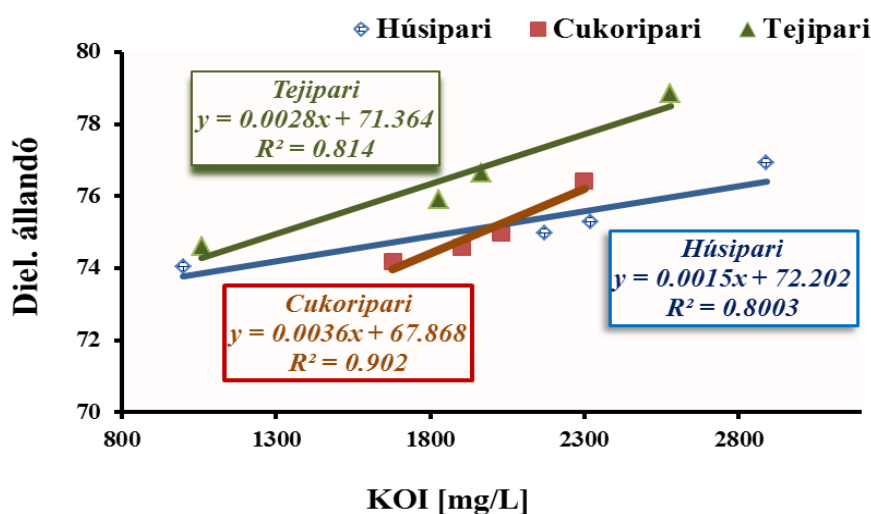
A savas és lúgos kémhatáson mikrohullámmal kezelt iszapminták esetében meghatároztuk a 30 napos, mezofil rothasztási folyamatban közben keletkező biogáz mennyiségét is (keletkező biogáz térfogata/szárazanyag mennyisége). A rothasztási próbák eredményei alapján megállapítható, hogy a BOI esetében tapasztaltaktól eltérően, az anaerob biológiai lebonthatóság szempontjából a lúgos kémhatásra beállított iszapminták mikrohullámú kezelése tekinthető eredményesebbnek. A kezeletlen iszapminta $85 \pm 4,2$ mL/g fajlagos biogáz kitermelési mutatója a pH=10,5, vagy ennél nagyobb pH-ra beállított minták esetében 150 kJ/L fajlagos, vagy ennél nagyobb mikrohullámú energiaintenzitású előkezelésekkel kb. 300 mL/g értékre volt növelhető (2. ábra). A tejipari iszap esetében tapasztaltak, miszerint a mikrohullámú energiaközléssel végzett kezelések már önmagukban is alkalmasak a biogáztermelés fokozására, illetve hogy a mikrohullámú előkezelés hatékonysága lúg adagolással tovább fokozható megegyeznek a szakirodalomban szereplő konklúziókkal is (pl.: Ahn et al., 2009; Dogan and Sanin, 2009; Eskicioglu et al., 2006).



2. ábra. Tejipari iszaphól keletkező biogáz mennyisége (30 napos kumulált térfogatból)

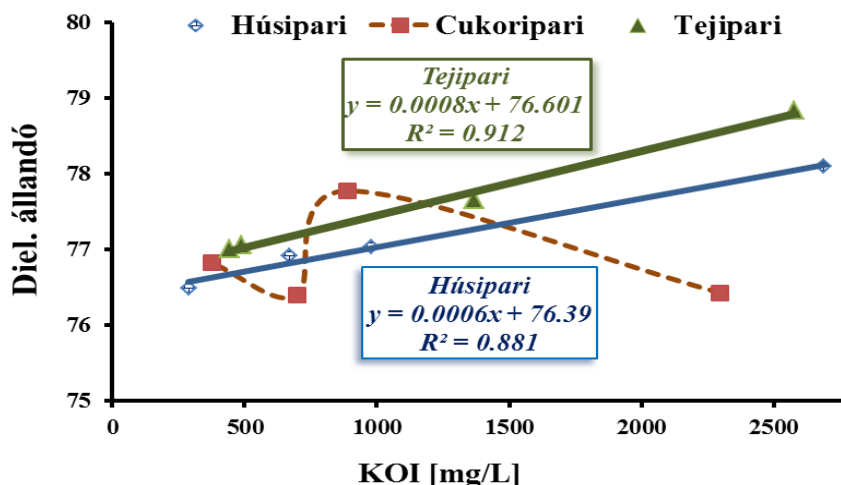
Az aerob és anaerob biológiai lebonthatósággal összefüggő paraméterek mellett vizsgáltuk az élelmiszeripari szennyvizek és iszapok dielektromos jellemzőit is. A kutatási eredmények közül a következőekben a szennyvizekre vonatkozó adatokat mutatjuk be. Az előzetes eredményeink alapján megállapítható volt, hogy szennyvíznél a dielektromos jellemzők közül a dielektromos állandó változásának mérése alkalmas elsősorban a szerves komponensek vízdíthatóságában végbemenő változások követésére. Ezen paraméter kezelése hatására bekövetkező változása volt a legnagyobb arányú. A vizsgálatoknál használt 200-2400 MHz tartományon belül a 400 MHz mérési frekvencia alkalmazása esetében tapasztaltuk a dielektromos állandó legnagyobb mértékű változását, ezen a frekvencián történő mérés a leginkább „érzékeny” a szervesanyag koncentráció változására, ezért az erre vonatkozó eredményeket szemléltetjük a 3-5. ábrákon.

A mikrohullámmal kezelt mintáknál a vízdítható fázisban lévő szervesanyagok koncentrációjával arányos KOI értékek valamennyi szennyvíz típus esetében (húsipari, tejipari, cukoripari) jól korreláltak a dielektromos állandóval (3. ábra).



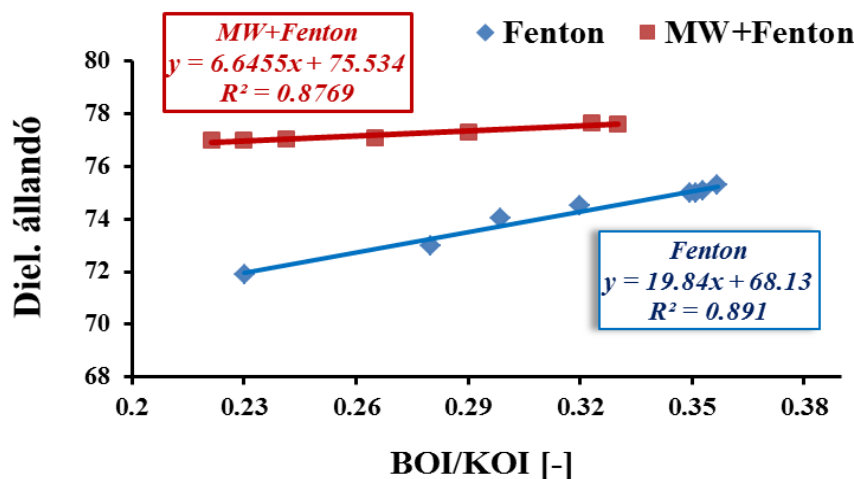
3. ábra. Dielektromos állandó és KOI kapcsolata különböző, élelmiszeripari eredetű szennyvizek esetében (mikrohullámmal kezelt mintáknál, 400 MHz frekvencián)

A mikrohullámú energiaközléssel kombinált Fenton eljárás alkalmazásakor, feltehetőleg az adagolt vas-szulfát és hidrogén-peroxid és a cukoripari szennyvízben lévő egyes egyszerű szénhidrát komponensek reakciói, illetve egymásra hatása a minta esetében olyan változásokat okozott az egyes komponensek, illetve az ezekből képződő termékek polarizációjában, ami a reflexión alapuló dielektromos méréseket zavarta, a rendszer dielektromos viselkedése nem követte a húsipari és tejipari szennyvíz esetében tapasztaltakat (4. ábra).



4. ábra. Dielektromos állandó és KOI kapcsolata különböző, élelmiszeripari eredetű szennyvizek esetében (kombinált mikrohullámú-Fenton eljárással kezelt mintáknál, 400 MHz frekvencián)

A tejipari szennyvíz esetében számítottuk a teljes szervesanyag mennyiségen belül a biológiailag könnyen lebontható vegyületek arányát jellemző BOI/KOI hányadost, illetve vizsgáltuk ezen – a biológiai lebonthatósággal szintén összefüggő - paraméter és a dielektromos állandó kapcsolatát. Megállapítható volt, hogy 400 MHz mérési frekvencián a dielektromos állandó és a BOI/KOI arány szoros, lineáris korrelációt mutat.



5. ábra. Dielektromos állandó és BOI/ KOI arány kapcsolata tejipari szennyvíznél (Fenton eljárás és MW+Fenton eljárással kezelt mintáknál, 400 MHz frekvencián)

4. Összefoglalás

A kutatási munkánk során a mikrohullámú energiaközlésen alapuló kezelési eljárások hatását vizsgáltuk az élelmiszeripari eredetű szennyvizek és iszapok biológiai hasznosíthatóságának hatékonyságával összefüggő paraméterek tekintetében. A kísérleti eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy a mikrohullámú energiaközlés önmagában is képes fokozni mind aerob, mind anaerob körülmények között a biológiai lebonthatóságot, azonban a kémiai kezelésekkel való kombinációja további hatékonyság növekedést eredményez. Az iszapkezelésben ipari léptékben is gyakran alkalmazott sav és lúgadalási módszer mikrohullámú energiaközléssel való kombinációja esetében megállapítottuk, hogy amíg az előkezeléseknél a savas kémhatás alkalmazása elsősorban az aerob biológiai lebonthatóság szempontjából, addig a lúg adagolás elsősorban az anaerob körülmények között, a biogáz termelődés fokozása szempontjából előnyös.

A dielektromos jellemzők egyidejű vizsgálata során megállapítottuk, hogy a dielektromos állandó mind a szennyvízkezelésekor a szervesanyag tartalom koncentráció változásával, mind a biológiai lebonthatósággal összefüggő mutatók változásával szoros korrelációt mutatott. Ezen előzetes alapján feltételezhető, hogy dielektromos mérésekkel a szennyvíztisztítási eljárások szervesanyag-eltávolítási hatásfoka, illetve a szennyvíz és iszapkezelési eljárások hatékonysága nyomon követhetővé, illetve már a kezelési folyamat során előrejelezhetővé válik.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási együttműködés az EFOP-3.6.2-16-2017-00010 azonosító számú „Fenntartható nyersanyag-gazdálkodás tematikus hálózat fejlesztése - RING 2017 projekt keretében valósult meg. A kutatást az OTKA (NKFI) K115691 projekt támogatta.

5. Hivatkozások

Ahn, J.H., Shin, S.G., Hwang S. (2009) Effect of microwave irradiation on the disintegration and acidogenesis of municipal secondary sludge. Chemical Engineering Journal, 153, 145-150.

Brodie, G., Destefani R., Schneider, P.A., Airey L., Jacob M.V. (2014) Dielectric properties of sewage biosolids measurement and modeling. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 48, 147-157.

Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., Basak, T. (2012) Microwave material processing-a review. Fluid Mechanics and Transport Phenomena, 58(2), 330-363.

Cravotto, G., Carlotto, S.D., Curini, M., Tumiatti, V., Roggero C. (2007) A new flow reactor for the treatment of polluted water with microwave and ultrasound, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 82, 205-208

Dogan, I., Sanin, F.D. (2009) Alkaline solubilization and microwave irradiation as a combined sludge disintegration and minimization method. Water Research, 43(8), 2139-2148

Ebenezer, A.V., Arulazhagan, P., Kumar, S.A., Yeom, I-T., Banu, J.R. (2015) Effect of deflocculation on the efficiency of low-energy microwave pretreatment and anaerobic biodegradation of waste activated sludge. Applied Energy, 145, 104-110.

Eskicioglu, C., Kennedy, K.J., Droste, R.L. (2006) Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment. Water Research, 40, 3725-3736

Eskicioglu, C., Prorot, A., Marin, J., Droste, R.L., Kennedy, K.J. (2008) Synergetic pretreatment of sewage sludge by microwave irradiation in presence of H₂O₂ for enhanced anaerobic digestion. Water Research, 42 (18), 4674-4682.

- Essaidi, N., Nadir, H., Martinod, E., Feix, N, Bertrand, V. Tantot, V., Lalande, M., Rossignol, S. (2017) Comparative study of dielectric properties of geopolymer matrices using different dielectric powders. *Journal of the European Ceramic Society*, 37, 3551–3557
- Jang, J., Ahn, J-H. (2013) Effect of microwave pretreatment in presence of NaOH on mesophilic anaerobic digestion of thickened waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 131, 437-442.
- Komarov, V., Wang, S., Tang, J. (2005) Permittivity and measurement. In: *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Vol.4., Wiley and Sons, Hoboken, 3694-3711.
- Kregiel, D., Berlowska, J., Szubzda, B. (2012) Novel permittivity test for determination of yeast surface charge and flocculation abilities. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39, 1881-1886.
- Kuglarz, M., Karakashev, D., Angelidaki, I. (2013) Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge. *Bioresource Technology*, 134:290-297.
- Lee, JH., Lee, JM., Lim, JS., Park, TJ., Byun, IG. (2015) Enhancement of microwave effect with addition of chemical agents in solubilization of waste activated sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 24, 359-364.
- Tang, B., Yu, L.F., Huang, S.S., Luo, J.Z., Zhuo, Y. (2010) Energy efficiency of pretreating excess sewage sludge with microwave irradiation. *Bioresource Technology* 101(14), 5092-5097.
- Tibayrenc, P., Preziosi-Belloy, L., Ghommidh C. (2011) On-line monitoring of dielectrical properties of yeast cells during a stress model alcoholiy fermentation. *Process Biochemistry*, 46, 193-201.
- Tyagi, V.K., Lo., S-L. (2013) Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 288-305.
- Venkatesh, M.S., Raghavan, G.S.V. (2004) An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*, 88(1), 1-18.