

Szennyvíziszapok biológiai lebonthatóságának és dielektromos jellemzőinek kapcsolata

Relationship between the biodegradability and dielectric properties of wastewater sludge

beszedes@mk.u-szeged.hu

¹SZTE Mérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézet, f. docens

²SZTE Mérnöki Kar Műszaki Intézet, tud. munkatárs

³SZTE Mérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézet, egyetemi tanár

⁴SZTE Mérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézet, egyetemi tanár

Bevezetés

A szennyvíztisztítás egyre szélesebb körű terjedésével az abban keletkező iszapok mennyisége is növekszik. Az iszapok a magas szervesanyag tartalmuknál fogva alkalmasak hasznosításra, például anaerob körülmények között biogáz előállítására. Azonban több iszaptípus esetében, azok szerkezete, illetve a szennyvízben lévő egyes toxikus, vagy korlátozó összetevők miatt a biológiai lebontás folyamata gátolt. Ebben az esetben más anyagokkal történő keverésre és/vagy az iszap hatékony előkezelésre van szükség. Az iszap előkezelések közül az utóbbi években egyre gyakrabban vizsgálják a mikrohullámú energiaközlésen alapuló gyors és intenzív eljárásokat. A mikrohullámú hőkezelés energetikai hatékonysága szempontjából a dielektromos jellemzők meghatározóak. A szakirodalomban a szennyvizek és az iszapok dielektromos jellemzőinek vizsgálata sajnos nem kellő mélységben kutatott terület.

A mikrohullámú energiaközlés a szennyvíz és iszapkezelésben

A szennyvíziszapok víztelenítési vagy hasznosítási eljárásai során legtöbb esetben az alapanyag kezelésére van szükség. Akár a víztelenítési eljárások hatáskörét, akár például a szennyvizek, vagy az azokból keletkező iszapok biológiai hasznosítását (pl.: komposztálás, biogázelőállítás célzatú anaerob fermentáció) tekintjük, a szervesanyag a komplex szerkezetű szervesanyag frakciók, illetve a sejtes alkotók sejtfalának és membránjainak integritásának csökkentése intenzifikáló hatású lehet. A sejtfalak lebontásának egyik gyors módszere a mikrohullámú energiaközlés. A mikrohullámú sugárzás sejtkomponens szintű abszorpciója következtében a sejtállomány víztartalma halmazállapot változáson megy keresztül, ami a sejtfalra ható nyomásnak egy kritikus szintet meghaladó értéke esetén a sejtfal integritásának megszűnéséhez vezet (Lucchesi et al., 2007).

A nyers, előkezelést nem kapott, iszapban hidrophil tulajdonságú, hidratburokkal körbevett kolloid részecskék vannak, amelyeket az elektrosztatikus taszítóerők tartanak távol. A nagyfrekvenciával változó polaritású mikrohullámú térben a vízmolekulák rotációja révén a hidratburok részlegesen felbomlik, a zeta-potenciál értéke csökken, így az iszapszerkezet destabilizálódik (Jones et al., 2002).

A víztelenítési eljárásokat megelőző mikrohullámú kondicionálás esetében megfigyelték, hogy flokkulálószerkezet alkalmazó szennyvíztisztítási technológiából származó iszapoknál a kezelési időtartam első részében az iszappelyhek szétesnek (fragmentálódtak), de a flokkulálószerkezet jelenléte miatt „újrapelyhesezési” mechanizmusok játszódnak le, azonban az így létrejött pelyhek tömörebbek, ezáltal a kötött víztartalom aránya az eredeténél alacsonyabb (Wojciechowska, 2005).

Az anaerob fermentáció során a mikrohullámmal kezelt iszapok esetében a szervesanyag-eltávolítás (lebontás) hatékonysága jobb, mint a kezeletlen iszapok esetében. A fehérjék esetében a lebomlás mértékének növekedése kb.10%-os, a teljes oldott szervesanyag tartalom esetében kb. 20%-os (Appels et al., 2013). Ennél – a százalékos növekményt tekintve – nagyobb arányú változások mentek végbe az illékony zsírsavak (VFAs) tekintetében. A

LVIII. GEORGIKON NAPOK

58th Georgikon Scientific Conference

mikrohullámú előkezelések hatására javuló biogáz-kihozatali mutatókat ezért az illékony zsírsavak koncentrációjának megkétszereződésére vezették vissza.

Azonban azt is meg kell jegyezni, hogy az optimálisnál nagyobb teljesítményintenzitású, vagy hosszabb idejű sugárzás néhány esetben a szennyvíz, vagy ennek fázisszeparálásból visszamaradó iszap néhány –elsősorban biológiai- hasznosítás eljárás során kedvezőtlen hatású lehet. A biológiai kezelési eljárások alkalmazhatóságának szempontjából a kommunális és egyes ipari tevékenységekben keletkező iszapok esetében a fémionok jelenléte is meghatározó. A mikrohullámú energiaközlésnek az iszappelyhekre gyakorolt erőteljes dezintegráló hatása következtében az iszapvízben megjelenő réz ionok koncentrációja növekszik, ami például az anaerob fermentáció során a hidrogén képződését inhibálja, így a gázképződés üteme csökken és a biogáztermelési mutatók romlanak (Guo et al., 2008).

A mikrohullámú kezeléseket követően az iszap szerkezeti változása következtében az iszap saját pehelyképzési tulajdonságai is megváltozhatnak. A termikus hatások következtében az iszappelyhek szétesnek (dezintegrálódnak), és ezzel párhuzamosan az extracelluláris polimer (EPS) frakció koncentrációja az iszapvízben növekszik. Az extracelluláris polimerek egy kritikus koncentrációjának elérése esetén azonban újrapelyhesedés játszódik le. A deflokkulációs-flokkulációs egyensúly a mikrohullámú kezelési idő növelésével azonban felborul, a hosszú idejű, és elsősorban a magas hőmérsékletű mikrohullámú kezeléseket esetében már a deflokkulációs mechanizmusok dominálnak. Ezért, és az egyéb - elsősorban a szénhidrát komponensek által elszenvedett - kedvezőtlen kémiai változások az iszap vízteleníthetőségét már rontják (Jones et al., 2002; Yu et al., 2009).

A dielektromos jellemzők szerepe a kezeléseket során

A mikrohullámú energiaközlésen alapuló anyagkezelési eljárások termikus és energetikai hatékonyságát az anyag dielektromos jellemzői nagymértékben meghatározzák. A dielektrikumok esetében, a mikrohullámú hőkeltés lehetséges mechanizmusai az ionos vezetés és a dipólus rotáció. Az ionos vezetés olyan rendszerek esetében megy végbe, ahol elmozdulásra képes ionok vannak jelen. A nagy frekvenciával változó elektromágneses (EM) térben a pólusok gyors felcserélődése miatt az ionok folyamatosan mozgásban vannak, ütköznek, ezért a kinetikai energiájuk egy része hővé alakul át (Metaxas and Meredith; 1993). A legtöbb folyékony halmazállapotú közeg esetében az alacsonyabb frekvenciatartományban az ionos vezetés, magasabb frekvenciatartományban pedig a dipólus rotáció hatása a jelentősebb (Tang et al., 2002).

A dielektromos jellemzőket elsősorban azon anyagokra vonatkozóan határozták meg a paramétereiket, amelyeknél a mikrohullámú energiaközlést felmelegítési célra, csíraszám csökkentésre, vagy gyors szárításra használták. Zhu és mtsai (2014) tej pasztörözési kísérletekhez kapcsolódóan vizsgálták a dielektromos jellemzők változásait és megállapították, hogy ezen alapanyag esetében is állandó hőmérsékleten a sugárzás frekvenciáját növelve a dielektromos állandó csökkent. A magasabb hőmérséklettartományban azonban a dielektromos állandó csökkenésének tendenciája nagyobb volt, mint az alacsonyabb hőmérséklettartományban.

Ez a mikrohullámú hőkezelések esetében hatékonysági problémákat okoz, hiszen a dielektromos jellemzők változása éppen a magas hőmérsékleten nagyobb arányú, ezért különösen fontos lenne a kezelési körülmények dinamikus szabályozása a maximális energiahatékonyság elérése céljából. A hőmérséklet növelése a Brown mozgások fokozódása miatt a statikus (nyugvó közegben mérhető) dielektromos állandó értékét csökkenti (Tang et al., 2002).

A dielektromos jellemzők mérésén alapuló vizsgálatokat több területen is sikeresen alkalmazták. A permittivitás mérést például sikeresen használták a fermentációs eljárások nyomon követésére, élesztőgomba szaporodás és flokkulációs jelenségek vizsgálata esetében. A fermentációs folyamatban a mikroorganizmusok, illetve szubsztrátjuk és anyagcseretermékeikből álló pelyhek képződése során a felületi töltési viszonyok megváltoznak. A pelyhesedési jelenségek kezdetekor a sejtek felületi töltése csökken, amely elektrosztatikus kromatográfiás

módszerrel, vagy zeta potenciál mérésével vizsgálható. Azonban a töltéssel, illetve felületi töltéssel rendelkező sejtek és részecskék a változó polaritású elektromágneses (EM) térben dielektrikumként viselkednek, amely lehetővé teszi a fermentációs folyamat során végbemenő változások nyomon követését a dielektromos tulajdonságok változásának meghatározása alapján.

A mikrohullámú sugárzás hatást gyakorolt az anyag szerkezetére, és az anyag szerkezeti (esetlegesen kémiai) változásai a dielektromos jellemzőkre vannak hatással, amely azonban a mikrohullámú sugárzás hatékonyságát is befolyásolja. A mikrohullámú szennyvíz és iszapkezelés esetében megállapították, hogy az az iszapteleket hatékonyan képes bontani. Az iszaprészecskék felbomlásával azonban az azokba zárt ionok és kis molekulatömegű komponensek kiszabadulnak. (Tang et al., 2010).

A mikrohullámú kezelések, illetve egyéb termikus kezelések esetében is bizonyított a részecskék formájában jelenlévő szervesanyagok vízdoldhatósági mértékének növekedése (Eskicioglu et al., 2006).. A vízdoldható fázisban lévő ionok és szerves komponensek koncentrációjának növekedése a folyékony hulladékok hasznosítását elősegíti, ha az valamilyen biológiai eljárás, vagy fermentáció keretében történik. Azonban a hasznosíthatóság javulása mellett ezen szerkezeti és kémiai változások a mikrohullámú kezelések termikus és energetikai hatásfokát is kedvezően befolyásolhatják.

A mikrohullámú sugárzásnak a valós többkomponensű rendszerekre, mint például a szennyvízre, gyakorolt hatásait vizsgálva megállapították, hogy a mikrohullámú frekvenciatartomány alkalmazása mind a fehérjék, mind a szénhidrátok esetében gyors lebomlást okozott. Azonban az ilyen összetételű anyagoknál a kétféle vegyületcsoport lebomlása következtében keletkező redukáló hatású cukrok és aminosavak együttes jelenléte magas kezelési hőmérséklettartománnyal párosulva a Maillard típusú reakciók lejátszódásához vezet, amelyeknek a termékei az lebomlás során keletkezett egyszerű szénhidrátok és aminosavaknál nagyobb molekulatömegűek, és ez a mikrohullámú kezelések energiahatékonyságát, a csökkenő dielektromos veszteségi tényező miatt már leronthatja.

Az iszapok esetében érdekes megfigyelés volt, hogy a nagy mikroorganizmus tartalom esetében, ha a kezeléseket magas hőmérsékleten végezték, a sejtmembránok lebomlása során az iszapvízben, vagyis a szabad víztartalomban, a membránokat stabilizáló kétértékű ionok koncentrációja növekedett (Ahn et al., 2009). Ez a hatás, mivel a mobilizálható ionok mennyiségét növelte, feltehetőleg már a mikrohullámú kezelés közben a dielektromos jellemzők változásához is vezetett. Az ionok koncentrációjának és a szabad víz mennyiségének a kötött víztartalom rovására történő növekedése, illetve a mikrohullám termikus hatására végbemenő nagymolekulájú anyagok bomlása következtében felszabaduló poláris tulajdonságú, vagy az EM térben könnyebben polarizálható molekulák megjelenése a dielektromos jellemzők értékére is hatással van, a dielektromos állandót és a dielektromos veszteségi tényezőt is növeli. A mikrohullámú energia disszipációja, és ezáltal a termikus kezeléseknél a kémiai eljárásokkal való kombinációja is ugyanezen okok miatt tekinthető sikeresnek.

A mikrohullámú sugárzást savas kezeléssel kombinálva, vagy a kezelt anyaghoz különböző sókat adagolva (pl. a szennyvíztisztításban használatos vas-klorid, polialumínium-klorid, stb) ezen anyagok az ionos vezetés, és a dipólusos polarizáció mértékét is erősítik, így a kombinált előkezelés szempontjából hatékonyság növekedés történik. Azonban ezen kombinált előkezelések hatékonyság elemzése esetében figyelembe kell venni, hogy bizonyos koncentrációtartomány felett adagolt sók, ha azok nem járulnak hozzá a szerves anyagokból történő flokkulációhoz (mint például a Ca^{2+}), akkor a szennyvíz sűrűségének és viszkozitásának növekedését okozzák, ami viszont az ionok csökkenő migrációs képessége és a poláris molekulák polarizációja szempontjából is hátrányos. Ha a flokkulációt elősegítő sókat adagolunk a rendszerhez, akkor az EM tér hővé történő transzformációja időlegesen javulhat, azonban a folyamat kezdetén széteső iszaptelek „újraépülése” a kezelés hatékonyságát ronthatja (Lee et al., 2015).

LVIII. GEORGIKON NAPOK

58th Georgikon Scientific Conference

A szennyvízben, valamint a kicsapatási módszereket alkalmazó szennyvíztisztítás során az ebből megmaradó híg iszapban a kolloidális és ennél nagyobb méretű részecskéket hidrátburok veszi körül. A nagyfrekvenciás változó polaritású mikrohullámú kezelőtérben a vízmolekulák rotációja következik be, ami a hidrátburok egy részének leválását okozza, az azt stabilizáló hidrogénkötések felbomlása miatt (Jones et al., 2002). Ez tulajdonképpen szintén a szabad víz arányát növeli a vizsgált anyagban, ami a dielektromos paraméterek változását okozza.

Anyag és módszer

A dielektromos jellemzőket egy, a SZTE Mérnöki Kar Folyamatmérnöki Intézetben fejlesztett dielektrométer berendezéssel mértük. A dielektromos állandó (ϵ') meghatározását a mérőtápvonalon vízszintesen átvezetett hengeres mintatartóról visszaverődő és a tápvonalban haladó elektromágneses hullámok egymásra hatása következtében kialakuló állóhullámok téresösségét mérő detektrodiódák felhasználásával végeztük.

A négyzetes karakterisztikájú diódák által leadott feszültségjeleket egy kétcsatornás NRVD típusú teljesítménymérő (Rohde&Schwarz) NRVZ típusú mérőfejeivel mértük, amely a mW-os tartományú mért teljesítmény értékeket egyenfeszültségű (DC) jellé konvertálja, majd a feszültségjeleket egy digitális myPCLab típusú adatgyűjtőn keresztül annak saját szoftverével rögzítettük.

A kialakuló elektromágneses hullámok maximális és minimális amplitudójához tartozó detektált teljesítménnyel arányos feszültségjel (U_{\max} és U_{\min}) ismeretében a reflexiós tényező (Γ), majd ebből a fázisszög (ϕ) számításával a dielektromos állandóval összefüggő veszteségszög (δ) adható meg. A veszteségszög ismeretében már a dielektromos állandó (ϵ') megadhatóvá válik:

$$\epsilon' = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}\delta^2}} \left(\frac{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma|\cos\phi}{1 + |\Gamma|^2 - 2|\Gamma|\cos\phi} \right)$$

A dielektromos jellemzőket vizsgáltuk álló közeg esetében (statikus mérések), illetve áramló rendszerben is.

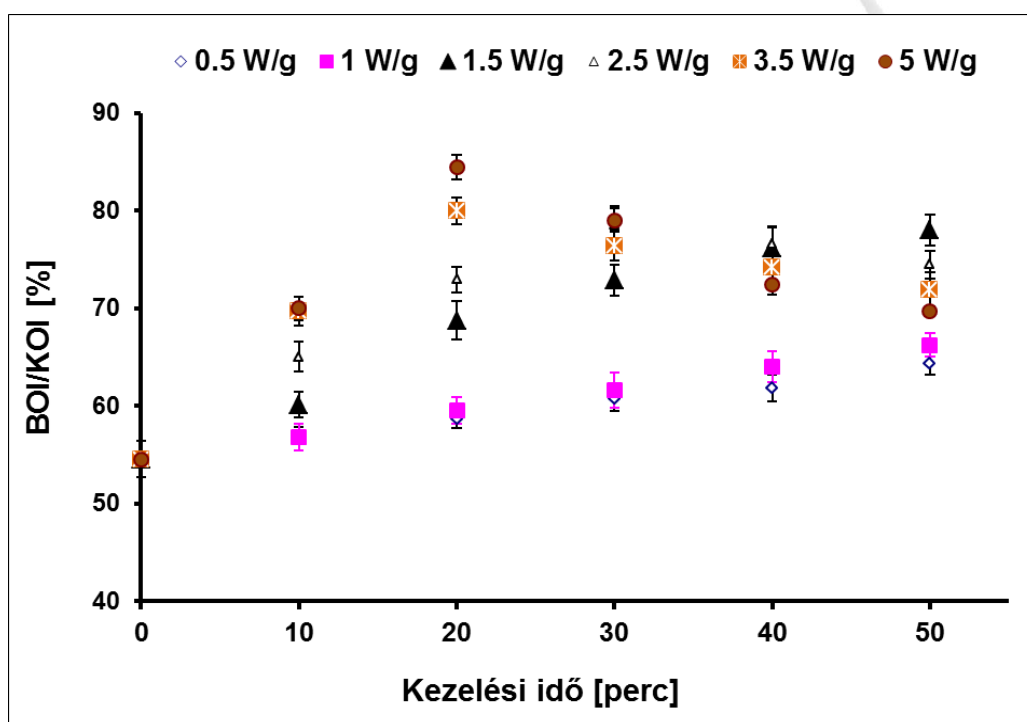
A vizsgálatainkhoz kommunális és tejipari eredetű szennyvizet használtunk fel. A szennyvizek mikrohullámú előkezelését egy folytonos anyagtovábbítású, 2450 MHz frekvenciájú magnetronnal felszerelt mikrohullámú kezelőrendszerben végeztük, amelyben a fajlagos teljesítményintenzitás (magnetronteljesítmény/a kezelőtérben tartózkodó anyag tömege) fokozatmentesen változtatható.

A kezelt anyag biológiai lebonthatóságát az 5 napos biológiai lebontási időszakra meghatározott biokémiai oxigénigény (BOI) és a teljes szervesanyagtartalommal korreláló kémiai oxigénigény (KOI) százalékos arányával jellemeztük. A BOI mérésekre respirometriás elven működő mérőrendszert (BOD Oxidirect), a kémiai oxigénigény mérésre kálium-bikromátos oxidációt követő fotometriás módszert (Lovibond COD Checkit) alkalmaztunk.

Kísérleti eredmények

A kísérleti eredményeink alapján megállapítható volt, hogy a mikrohullámú energiaközlés alkalmazásával az aerob biológiai lebonthatóság mértékével összefüggő BOI/KOI arány a kezeltlen kommunális iszap, valamint a tejipari eredetű szennyvíziszap esetében is növelhető volt. A kommunális iszap eredeti kb. 28%-os BOI/KOI aránya a mikrohullámú kezeléssel 53% fölé volt növelhető, a tejipari iszap esetében a kezdeti 54%-os aerob lebonthatóság 80% fölé növekedett (1. ábra).

A biológiai lebonthatóság mértékének változását a kezelések során alkalmazott fajlagos teljesítményintenzitás és a kezelési idő egyaránt befolyásolta. Az előkezelések során alkalmazott energia (teljesítmény×kezelési idő) növelése fokozta a lebonthatóság mértékét, azonban egyes, különösen a nagy teljesítményintenzitású, kezelések esetében a hosszabb besugárzási idő már rontott a lebonthatóságon.



1. Ábra. Tejipari iszap BOI/KOI arányának változása a mikrohullámú kezelés hatására

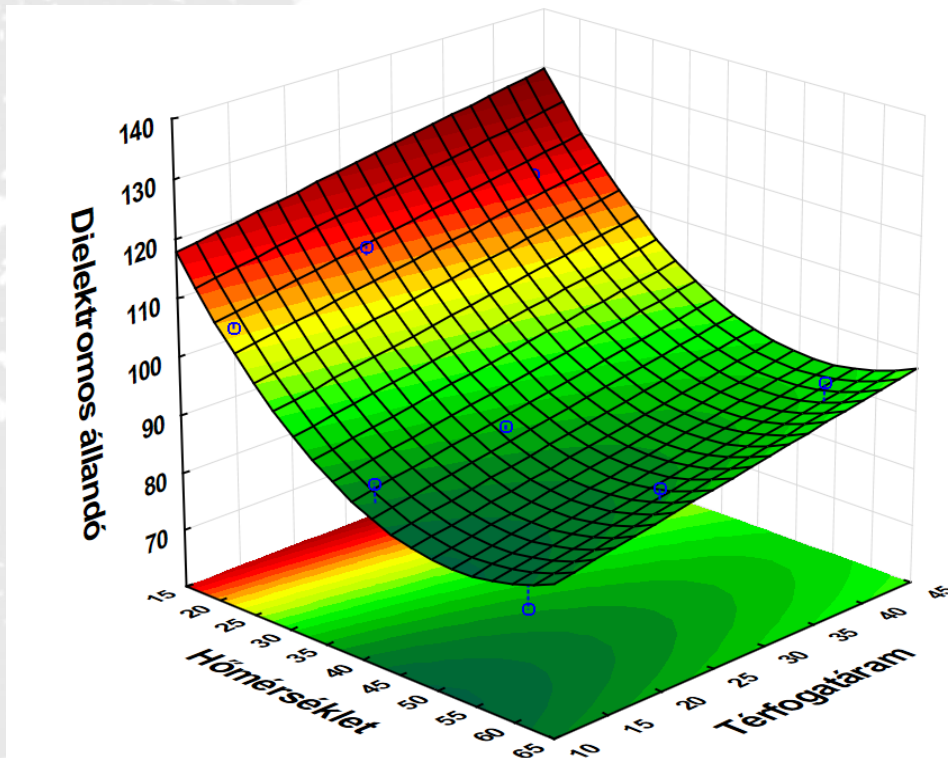
A mikrohullámú energiaközlés hatására az iszapstruktúra, a teljesítményintenzitástól és hőmérséklettől függően mértékben felbomlik. Ennek következtében az iszap polimerhálós szerkezetében lévő egyes szerves és szervetlen komponensek az iszapvízben oldott állapotúvá válnak. Másrészt, egy kritikus teljesítményintenzitás vagy hőmérséklet elérése esetén a sejtes elemek sejtfala felnyílik, ezért a sejtnedvek kiáramlása szintén az oldható formában lévő komponensek arányát növeli.

Mivel mind aerob, mind anaerob körülmények között a biológiai lebonthatóság mértéke a mikroorganizmusok számára hozzáférhető szervesanyagok, mint szubszttrátok, oldhatósága által nagymértékben meghatározott, a mikrohullámú energiaközlés termikus hatására növekvő szervesanyag oldhatóság a lebonthatóság mértékének növekedéséhez vezet.

A különböző előkezelések hatására az iszapban bekövetkező fiziko-kémiai változások azonban az anyag dielektromos jellemzőire is hatást gyakorolnak. Az iszap polimerhálós szerkezetének felbomlása, a sejthártyák részleges lebomlása, illetve a termikus vagy termokémiai hatásra a makromolekulák részleges hidrolízise, a kisebb molekulatömegű, poláris komponensek és ionok mennyiségét növeli az iszapvízben. A poláris tulajdonság, a felületi töltéserősség növekedése, illetve a kisebb méretű komponensek megjelenése egyaránt polarizálhatóság fokozódásához vezet, különösen akkor ha a hőmérséklet növekedése, és a szerves polimerek részleges lebomlása miatt a folytonos közeg viszkozitása is csökken.

A kísérleteink során ezért megvizsgáltuk, hogy az anyag hőmérsékletváltozása, illetve a közben végbemenő anyagszerkezeti változások mérhető hatást gyakorolnak-e a dielektromos jellemzőkre. A mérések során először a kommunális szennyvíz és iszap dielektromos jellemzői közül a dielektromos állandó értékét határoztuk meg. A kommunális szennyvíz és iszap minták egy városi szennyvíztisztító telepről származtak.

A szennyvíztisztítási technológia egyes lépcsőiből (előzetes mechnaika tisztítás, biológiai tisztítás, utóülepítés) származó minták esetében mérhető dielektromos állandók értékei között különbséget tapasztaltunk, vagyis a tisztítás során a szervesanyag csökkenés nyomonkövethető volt a dielektromos paraméterek változásával. A szennyvízhez hasonló, valós heterogén rendszerekben, azonban a közeg áramlása is hatást gyakorolhat a dielektromos jellemzőkre, ezért a dielektromos méréseket nemcsak statikus, hanem a minta áramoltatásra alkalmas kísérleti elrendezésben is vizsgáltuk.



2. Ábra. Nyers kommunális szennyvíz dielektromos állandója
(hőmérséklet °C; térfogatáram Lh^{-1} mértékegységben)

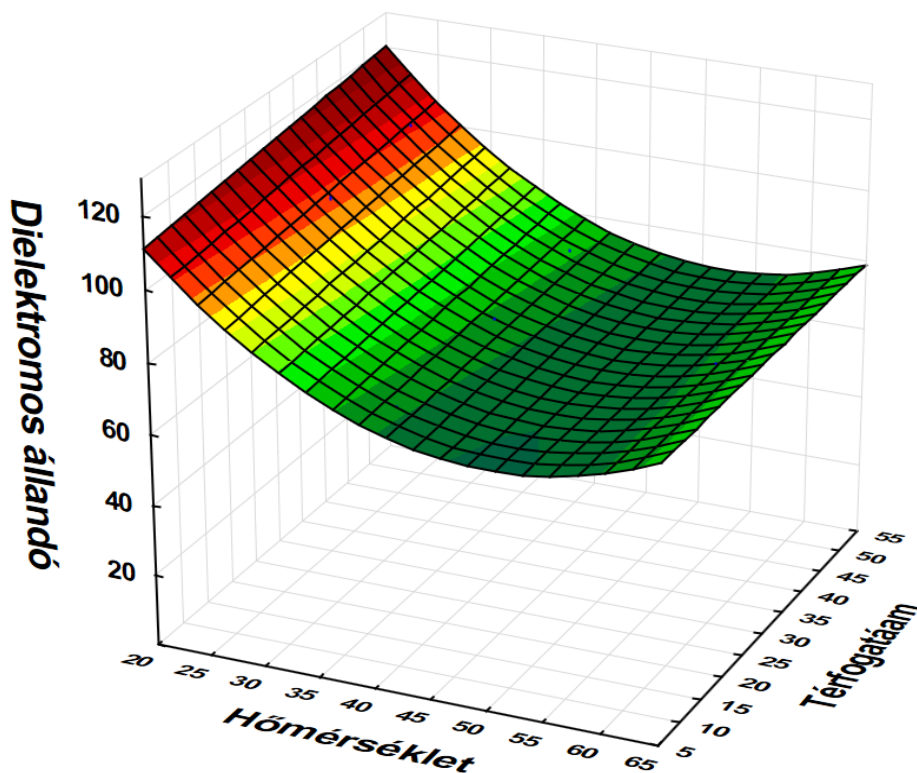
A hőmérséklet és a térfogatáram hatását a kísérleti eredmények alapján meghatározott válaszfelület mutatja be (2. ábra). Ez alapján megállapítható, hogy a nyers kommunális szennyvíz esetében mind a hőmérséklet, mind az anyag áramlási sebessége egyaránt befolyásolja a dielektromos állandó értékét. A hatások vizsgálata során, az ANOVA eredményei alapján a 95%-os szinten szignifikáns hatású változók (hőmérséklet= x_1 ; térfogatáram= x_2) felhasználásával a következő regressziós egyenlet adható meg a dielektromos állandóra (ϵ'):

$$\epsilon' = 149,36 - 2,72x_1 + 0,026x_1^2 + 0,335x_2$$

Ugyanazén vizsgálatokat tejipari szennyvíz esetében is elvégeztük, amely eredményeit a 3. ábra szemlélteti.

LVIII. GEORGIKON NAPOK

58th Georgikon Scientific Conference



3. Ábra. Tejipari szennyvíz dielektromos állandója
(hőmérséklet °C; térfogatáram Lb^{-1} mértékegységben)

A tejipari szennyvíz dielektromos állandó értékének meghatározására alkotható összefüggés a következő:

$$\varepsilon' = 178,86 - 4,837X_1 + 0,0484X_1^2 + 0,25 X_2 - 0,0036 X_2^2$$

A víz esetében, egy adott frekvencián a hőmérséklet növekedése a dielektromos állandó értékének csökkenését okozza, ezért hasonló viselkedés volt várható a nagy víztartalmú szennyvizek és iszapok vizsgálata során is. Azonban mindkét alapanyag esetében látható, hogy a hőmérséklet növelése egy, egy kritikus hőmérséklet (amely érték alapanyagfüggő) elérése után a dielektromos állandó növekedni kezdett. A kritikus hőmérséklettartomány elérésekor a szennyvízben és iszapban olyan szerkezeti és kémiai változások mennek végbe, amelyek a dielektromos jellemzők hőmérsékletfüggő trendjét megváltoztatják. Ezen előzetes eredmények alapján tehát a szennyvíz tisztításakor, valamint az iszapok előkezelésekor végbemenő változások, illetve a folyamatközbeni anyagszerkezeti változások dinamikája a dielektromos mérési módszer nyomkövethető, kontrollálható, a kezelések hatékonysága előrejelezhető.

Az eredményeink alapján továbbá megállapítható, hogy a szervesanyag részecskéket is tartalmazó sok komponensű nem tisztított (nyers) szennyvíz típusok esetében az anyag térfogatárama hatással van a mérhető dielektromos jellemzőkre, a növekvő sebességű áramlás a dielektromos állandó értékét növeli. Ezen megfigyelés az áramló fluidum homogenitásának javulásával, illetve a turbulencia polarizálhatóságra gyakorolt hatásával magyarázható. A dielektromos állandónak a térfogatáram fokozása hatására való növekedése valós kezelési körülmények között a mikrohullámú kezelés termikus hatásfokának növekedését vetíti előre.

LVIII. GEORGIKON NAPOK

58th Georgikon Scientific Conference

Összefoglalás

A kutatási célkitűzésünk különböző szennyvizek és iszapok dielektromos jellemzőinek, valamint a mikrohullámú kezelés alatt a biológiai lebonthatóságban végbemenő változások meghatározására irányult a leggyakrabban használt 2450 MHz frekvencián. Az eredményeink alapján megállapítottuk, hogy valós alapanyag mátrixban statikus és áramló rendszerben mérhető dielektromos jellemzők értékei között különbségek vannak, a dielektromos jellemzők alkalmasak a szennyvízben és az iszapban végbemenő fiziko-kémiai változások nyomon követésére, továbbá a dielektromos paraméterek és a biológiai lebonthatósági indikátorok változások tendenciái között összefüggés van. Ezen eredmények alapján a mikrohullámú, vagy egyéb előkezelések folyamatközbeni kontrollja és eredményessége nyomonkövethetővé és előrejelezhetővé válik.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az NKFI K0115691 projekt támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

1. Ahn J.H., Shin S.G., Hwang S. Effect of microwave irradiation on the disintegration and acidogenesis of municipal secondary sludge. *Chemical Engineering Journal* 153, 2009, 145-150.
2. Guo L., Li X., Bo X., Yang Q., Zeng G., Liao D., Liu J. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydrogen producing using waste sludge. *Bioresource Technology* 99, 2008, 3651-3658.
3. Eskicioglu C., Kennedy K.J., Droste R.L. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment. *Water Research* 40, 2006, 3725-3736
4. Jones DA., Lelyveld T.P., Mavrofidis S.D., Kingman S.W., Miles N.J. :Microwave heating applications in environmental engineering-a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 34, 2002, 75-90.
5. Lee JH., Lee JM., Lim JS., Park TJ., Byun IG.: Enhancement of microwave effect with addition of chemical agents in solubilization of waste activated sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 24, 2015, 359-364.
6. Lucchesi M.E., Smadja J., Bradshaw S., Louw W., Chemat F. Solvent free microwave extraction of *Ellataria cardamonum* L.: a multivariate study of a new technique for the extraction of essential oil. *Journal of Food Engineering* 79, 2007, 1079-1086.
7. Metaxas AC., Meredith RJ. Industrial microwave heating. *Power Engineering Series 4*. Peter Peregrinus Ltd. (IEE),, 1993, 376 p.
8. Tang J., Feng H., Lau M. Microwave heating in food processing. In Yang and Tang eds. *Advances in Bioprocessing Engineering Vol.1.*, World Scientific, London UK, 2002, 173 p.
9. 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.
10. Yu Q., Lei H., Yu G., Feng X., Li Z., Wu Z. Influence of microwave irradiation on sludge dewaterability. *Chemical Engineering Journal* 155, 2009, 88-93.
11. Wojciechowska E. Application of microwaves for sewage sludge conditioning. *Water Resource* 39, 2005, 4749-4754.
12. Zhu X., Guo W., Jia Y.: Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4500 MHz relevant to radio frequency and microwave pasteurization process. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6), 2014, 1830-1839.