

AZ ELEVENISZAP REOLÓGIAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA AZ ISZAPPEHELY SZERKEZET ÉS ÜLEPÍTHETŐSÉG FÜGGVÉNYÉBEN II.: 2017-BEN ELÉRT EREDMÉNYEK

BAKOS VINCE¹, GYARMATI BENJÁMIN², LAURENT VACHOUD³, EMILIE RUIZ³, NAGY GÖDE PÉTER⁴, NAGY ESZTER¹, KOVÁCS RÉKA¹, MICHÈLE DELALONDE³, CHRISTELLE WISNIEWSKI³

¹ BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM,
ALKALMAZOTT BIOTECHNOLÓGIA ÉS ÉLELMISZER-TUDOMÁNYI
TANSZÉK, 1111 BUDAPEST

² BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM,
FIZIKAI KÉMIA ÉS ANYAGTUDOMÁNYI TANSZÉK, 1111 BUDAPEST

³ UMR QUALISUD (UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER,
FACULTÉ DE PHARMACIE), (TA B95/16 – 73 RUE JEAN-FRANCOIS
BRETON, 34398 MONTPELLIER CEDEX 5, FRANCE)

⁴ DUNA-MENTI REGIONÁLIS VÍZMŰVEK ZRT., 2600 VÁC,
KODÁLY ZOLTÁN ÚT 3.

A kutatás 2015-2016. évben elért eredményeit a Hírcsatorna előző számában (2017/5. szám, pp. 17-24) ugyanebben a témában megjelent cikkünk foglalja össze (Bakos et al. 2017).

RÖVID ÖSSZEFOGLALÁS

A magyar-francia kétoldalú projekt keretében végzett kutatás célja az volt, hogy az eleveniszap reológiai tulajdonságait megvizsgáljuk az iszappehely szerkezet alakulásának függvényében. A 2015-16. évben elért eredményekre támaszkodva, és a kidolgozott

reológiai mérési módszerrel, két egyidejűleg üzemeltetett folytonos üzemű eleveniszapos modellrendszert működtettünk, az egyikben viszkózus iszappuffadást, a másikban ún. low S – low DO fonalasodást előidézve. Az eredmények azt mutatták, hogy a drasztikus

ülededés romlást okozó változások – az extracelluláris poliszacharid túltermelés és a fonalasodás – egyaránt, de különböző mértékben a viszkozitás és a konzisztencia növekedését eredményezték. A 3,5 g/l eleveniszap koncentráció mellett végzett reológiai mérések eredményei arról tanúskodtak, hogy ún. „double gap” (koncentrikus henger) mérőfej alkalmazásával a jellemzően alacsony viszkozitás tartományban pontosabb eredmények érhetők el, mint ún. lap-lap elrendezéssel.

Kulcsszavak: eleveniszap, fonalasodás, viszkózus iszappuffadás, reológia, viszkozitás

BEVEZETÉS, A KUTATÁS CÉLJA

Bár egyre gazdagabb szakirodalom (Seyssiecq et al. 2003, Estiaghi et al. 2013, Ratkovich et al. 2013) foglalkozik az eleveniszap reológiai tulajdonságainak különböző tényezők szerinti függésével (pl. iszapkoncentráció, hőmérséklet, szerves anyag tartalom, stb.), az eleveniszap pehelyszerkezet és ülephetőség alakulásának függvényében végzett, reológiai tulajdonságokra vonatkozó vizsgálatok nem jellemzőek, a téma irodalma hiányosnak mondható.

Az eleveniszap reológiai tulajdonságainak vizsgálatát a 2015-16-ban végzett kísérletek során kidolgozott mérési módszerekre és eredményekre (Bakos et al. 2017) támaszkodva

folytattuk 2017-ben. A 2016 tavaszán végzett laboratóriumi modellkísérlet során nem vált egyértelművé, hogy az iszap ülededésének leromlásával megnövekedő viszkozitást és konzisztenciát a fonalasodás, avagy a viszkózus iszappuffadás okozza, ill. melyik szerkezetváltozás milyen mértékben felelős értük. Miután a korábbi kísérletben a fonalasok és az extracelluláris poliszacharidok együttes túlzott jelenléte volt jellemző, ezúttal két külön rendszerben céloztuk elérni önmagában a fonalasodást és a viszkózus iszappuffadást.

Ennek megfelelően két különböző folytonos üzemű laboratóriumi modellrendszert üzemeltettünk, amelyek egyikében az extracelluláris poliszacharidok (EPS: extracellular polysaccharides) túltermelése (Kovács, 2017), míg a másikban a fonalas iszappuffadás előidézése (Nagy, 2017) volt a cél. A kapott eredmények lehetővé tették az alkalmazott reológiai mérési módszerek összehasonlítását, valamint a két rendszer és a 2016-ban kivitelezett kísérlet eredményeinek összehasonlító értékelését is.

KUTATÁSI KONCEPCIÓ, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A célok eléréséhez folytonos üzemű laboratóriumi modellkísérletekben előidéztük az eleveniszap viszkózus iszappuffadását (*EPS termelő rendszer*), ill. fonalasodását (*Fonalas rendszer*).

A kísérleti rendszerek bioreaktor elrendezése megegyezett (lásd. **1. és 2. ábrák**), az egyetlen aerob bioreaktor 9,5 l hasznos térfogatú volt (hidraulikai tartózkodási idő = 19 h). Mivel a *Fonalas rendszerben* ún. low S – low DO (alacsony szubsztrát – alacsony oldott oxigén koncentráció mellett) fonalasodást kívántunk előidézni, a levegőztetés intenzitását nagymértékben csökkentettük, és a gyenge levegőztetés mellett reaktorbeli iszap kiülepedés elkerülésére mechanikai keverést is alkalmaztunk. A modell rendszereket 30 napon át üzemeltettük.

A kísérleti rendszereket az Észak-budapesti Szennyvíztisztító Telepről származó ideális-közeli szerkezetű, jól ülepedő eleveniszappal indítottuk el, és a bioreaktorokra folytonos betáplálással műszennyvizet adagoltunk. Az *EPS termelő rendszer* esetén az alkalmazott tápanyaghiányos összetétel kristálycukrot, Na-acetátot, félfédes fehér bort, di-kálium-hidrogén-foszfátot és Ca-, valamint Mg-sókat tartalmazott, amelyhez nem történt kiegészítő N forrás adagolás, és a hozzáadott foszfor mennyisége is minimális volt. A *Fonalas rendszer* esetén a befolyó szennyvíz peptont, Na-acetátot, di-kálium-hidrogén-foszfátot és Ca-, valamint Mg-sókat tartalmazott, itt cél volt az alacsony KOI koncentráció biztosítása, és a szűkös N és P elérhetőség (Jenkins et al. 2004).

A 2016-ban végzett laboratóriumi kísérlethez (Bakos et al. 2017) hasonlóan nyomon követtük a befolyó és az elfolyó szennyvíz pH-ját, KOI, NH_4N , NO_3N és PO_4P koncentrációját,

a hőmérsékletet, a biomassza koncentrációt és az iszap ülepedési indexet (hígítatlanul és hígítva egyaránt – SVI és DSVI), mikroszkópos vizsgálatokkal (Olympus CX41) pedig az iszap hely szerkezetének változását. mind natív, mind pedig festett minták vizsgálatával. Az extracelluláris poliszaccharidok jelenlétének kimutatására tusfestést, a *Fonalas rendszerben* a fonalasok minőségi meghatározásához pedig Gram és Neisser festési eljárásokat alkalmaztunk (Jenkins et al. 2004). A fonalasok gyakoriságának pontos számszerűsítésére Nagy Göde Péter optikai vizsgálati módszerét alkalmaztuk (Nagy Göde, 2010).

A reológiai méréseket Anton Paar Physica MCR 301 típusú mérőműszerrel végeztük el kétféle mérőfej alkalmazásával. A BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék Lágyszilárdságok Csoportjának laboratóriumában PP50/S laplap mérőfejjel rotációs üzemmódban, 2 mm mérési réstávolsággal végeztük el a vizsgálatokat, míg bizonyos mintákat az UMR Qualisud (Université de Montpellier, Montpellier, Franciaország) laboratóriuma is megvizsgált ugyanilyen típusú mérőberendezéssel, de ún. „double gap” (koncentrikus henger) kialakítású mérőfej alkalmazásával. A vizsgált eleveniszap minták koncentrációját a mérések előtt egységesen 3,5 g/l értékre állítottuk (tisztított szennyvízzel való hígítással vagy dekantálással), a viszkozitást 0,01 – 1000 s^{-1} nyírási sebesség tartományban mértük. Ezt követően a mért látszólagos viszkozitás adatokat a 0,1 – 100 s^{-1} nyírási sebesség tartományon értékeltük ki, és a reológiai görbékből (nyírási sebesség vs. viszkozitás) meghatároztuk

a vizsgált szuszpenziók konzisztencia együtthatóját (K , [Pa.sⁿ]), valamint folyási indexét (n , [-]) az Ostwald hatvány összefüggés felhasználásával (lásd. 1. egyenlet, Khongnakorn et al. 2010).

1. egyenlet $\eta = K * \dot{\gamma}^{(n-1)}$

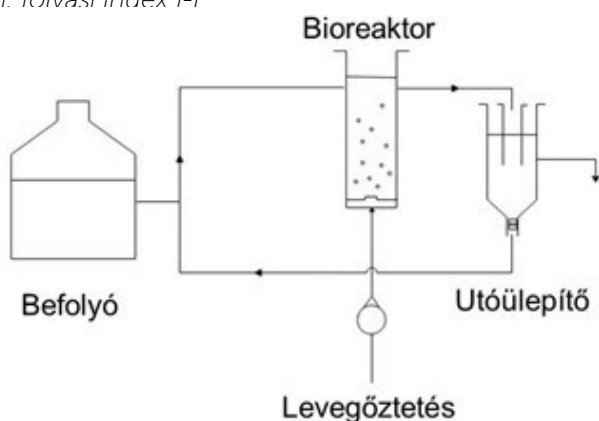
ahol:

η : viszkozitás [Pa.s]

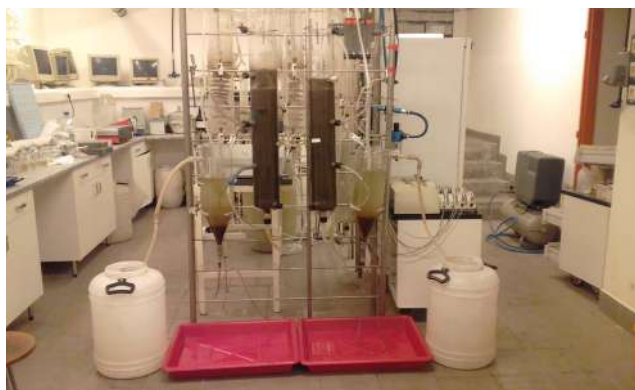
K : konzisztencia koefficiens [Pa.sⁿ]

$\dot{\gamma}$: nyírási sebesség [1/s]

n : folyási index [-]



1. ábra: A 2017 tavaszán összeállított modell berendezések technológiai elrendezési rajza



2. ábra: A 2017 tavaszán összeállított modell berendezések fényképe (Balra: EPS termelő rendszer, Jobbra: Fonas rendszer, Bakos Vince felvétele)

EREDMÉNYEK

A betáplálásra naponta frissen előállított műszennyvizet termosztált hűtőszekrényben, 7,0–9,5 °C között tároltuk, hogy a szerves anyag lebomlását elkerüljük. A bioreaktorok hőmérséklete 17,0–21,5 °C közötti értékeket vett fel a laborhőmérsékletnek megfelelően.

Az *EPS termelő rendszert* intenzíven levegőztettük, így a kísérlet elején a bioreaktorban 6 mg/l-nél magasabb oldott oxigén koncentráció is elérhető volt. Ez azonban már egy hét elteltével 4,0–4,5 mg/l közé mérséklődött. A levegőztető diffúzorát szükséges volt rendszeresen tisztítani, mivel a ráakódott biofilm, ill. extracelluláris polimer réteg egy idő után nem tette lehetővé a megfelelően kisméretű buborékok képződését, így csökkentve az oxigénátadás hatékonyságát. A kísérlet második felében a DO koncentráció 0,6–2,8 mg/l között mozgott, így alacsony oldott oxigén koncentrációjú állapot is előfordult.

A *Fonalas rendszer* esetében nagyon kis térfogatáramú levegőztetést alkalmaztunk, hogy alacsony oldott oxigén koncentrációt, és így fonalas növekedési előnyt biztosítsunk (low DO körülmények), az oldott oxigén szint a kísérlet alatt jellemzően a 0,05–0,3 mg/l tartományban mozgott.

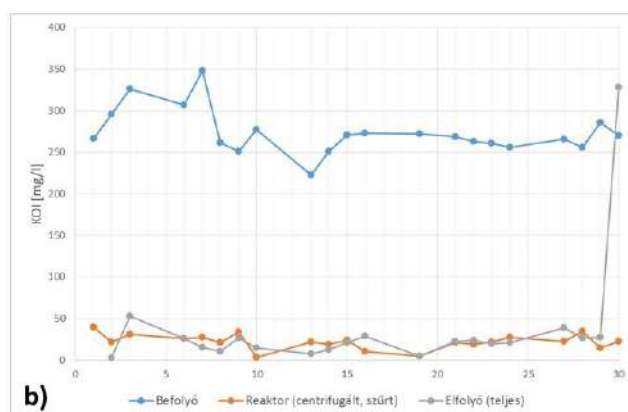
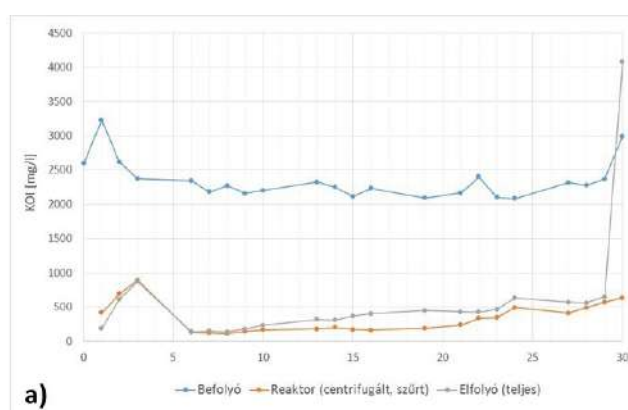
A **3. ábra** a kísérleti rendszerek KOI koncentrációit mutatja be. Az *EPS termelő rendszerben* a kezdeti adaptációs időszakot követően 90% feletti KOI eltávolítási hatékonyság volt megfigyelhető. Az elfolyó KOI koncentráció

növekedéséhez az elúszó lebegőanyag és a megemelkedő EPS tartalom mellett a leromló oxigén beviteli hatékonysággal lecsökkenő oldott oxigén koncentráció járulhatott hozzá. A *Fonalas rendszer* esetében végig 85% feletti KOI eltávolítás volt jellemző. A kísérlet utolsó napján a mindkét rendszerben jelentkező, feltelt utóülepítőből történő iszap-elúszás miatt a KOI koncentráció drasztikusan megemelkedett az elfolyóban, a kísérleti rendszerek üzemeltethetlenné váltak.

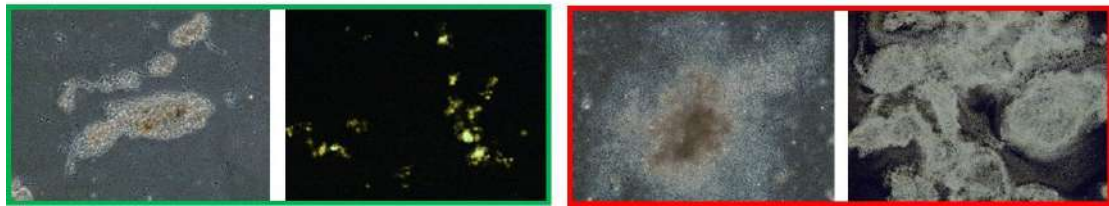
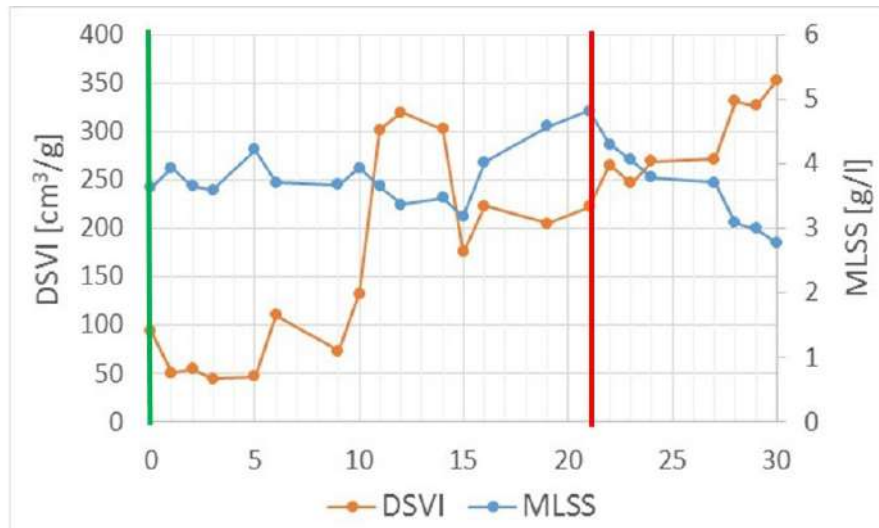
A **4. ábra** diagramja arról tanúskodik, hogy az EPS termelő rendszerben kialakuló eleveniszap ülepíthetősége kb. 10 nap elteltével drasztikusan leromlott, ami a mikroszkópos képeken látható módon az extracelluláris poliszacharid túltermelődés miatt állt elő. Az iszapban fonalasok csak elvétve és kis számban fordultak elő. Az iszap ülepedési index a kísérlet végére meghaladta a $300 \text{ cm}^3/\text{g}$ értéket, ami egyúttal a bioreaktor hígulásához, az utóülepítő felteléséhez és iszapelúszáshoz vezetett.

A *Fonalas rendszerben* az ülepíthetőség nagymértékű és gyors leromlása a 13. naptól kezdődött (lásd. **5. ábra** diagramja). Annak ellenére, hogy csak a napi mintavételeknek megfelelő minimális, kb. $200\text{--}400 \text{ cm}^3/\text{d}$ iszapelvétel történt, állandó stabil iszapkoncentráció nem volt tartható a bioreaktorban. Az iszapkoncentráció csökkenése a kevés befolyó szubsztrát mennyiséggel, az oldott oxigén és a tápanyagok szűkösségével magyarázható. A kísérlet vége felé ennek megfelelően nagy kihívást jelentett a reológiai

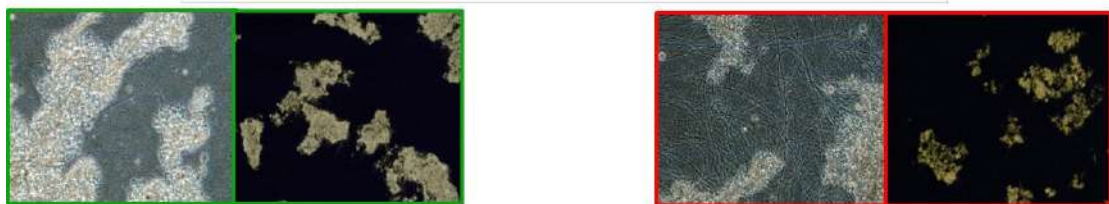
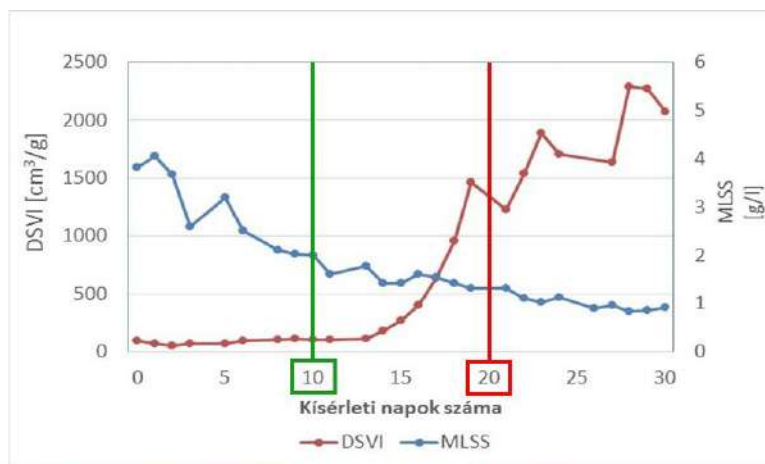
mérések előtt az iszapkoncentrációt $3,5 \text{ g/l}$ -re beállítani dekantálással (különösen, hogy az iszap egyre nehezebben ülepedett). A hígított iszap ülepedési index a kísérlet végére (részben az igen alacsony iszapkoncentráció következtében) szélsőségesen magas, $2000 \text{ cm}^3/\text{g}$ körüli értékeket ért el. A natív mintákról készült mikroszkópos képek jól mutatják a fonalasok drasztikus felszaporodását, a tussal festett minták pedig azt igazolják, hogy extracelluláris poliszacharid túltermelés a *Fonalas rendszerben* nem történt.



3. ábra: A KOI koncentráció alakulása a) az EPS termelő rendszerben b) a *Fonalas* rendszerben



4. ábra: Az iszap ülepedési index és az iszapkoncentráció alakulása az EPS termelő rendszerben
(Mikroszkópos képek: natív képek – 200-szoros nagyítás, tussal festett képek – 100-szoros nagyítás)



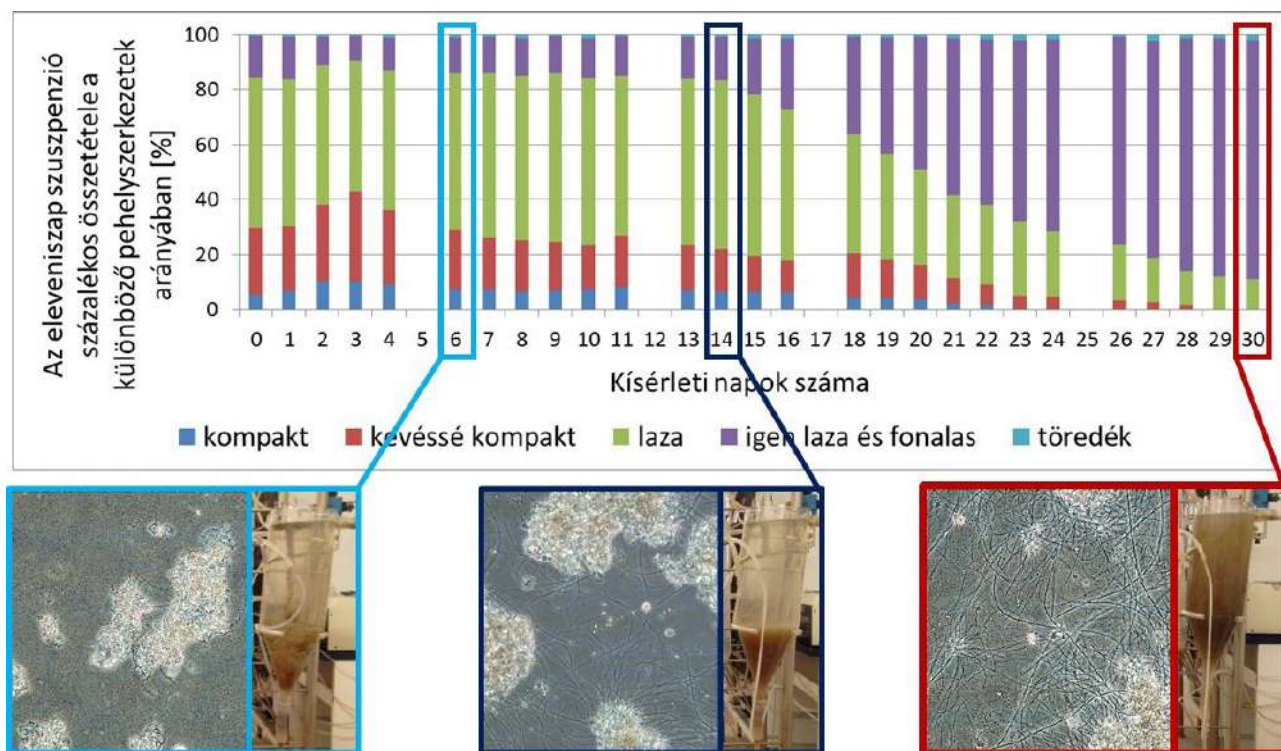
5. ábra: Az iszap ülepedési index és az iszapkoncentráció alakulása a Fonalas rendszerben
(Mikroszkópos képek: natív képek – 200-szoros nagyítás, tussal festett képek – 100-szoros nagyítás)

Megállapítható, hogy mindkét rendszerben sikerült elérni a kísérleti célt, azaz ugyanaból az ideális-közelí flokkulum szerkezetből kiindulva az *EPS termelő* rendszerben önállóan a viszkózus iszappuffadás, a *Fonalas rendszerben* pedig önállóan a fonalasodás előidézését.

A *Fonalas rendszerben* a fonalasok mennyiségi meghatározását Nagy Göde Péter optikai módszerével végeztük el (Nagy Göde, 2010), a vizsgálat igen jól számszerűsítette, amit szabad szemmel a mikroszkópos vizsgálatnál tapasztaltunk. A **6. ábra** diagramja és mikroszkópos képei azt mutatják, hogy

a kísérlet 13-14. napjától kezdve a fonalasok száma gyors növekedésnek indult, és a kísérlet végére az eleveniszap 90%-ban fonalas szervezeteket tartalmazott.

A Gram és Neisser festés alkalmazásával történt fonalas minőségi meghatározás azt mutatta, hogy a *Fonalas rendszer* eleveniszapja tartalmazott *Microthrix parvicella*, *Haliscomenobacter hydrossis*, *Nostocoida limicola II* és *Nostocoida limicola III* fajokat, ugyanakkor a kísérlet második felében bekövetkező nagymértékű fonalasodásért elsősorban a *Type 021N* és a *Thiothrix II* fajok nagy gyakoriságú elterjedése volt felelős.

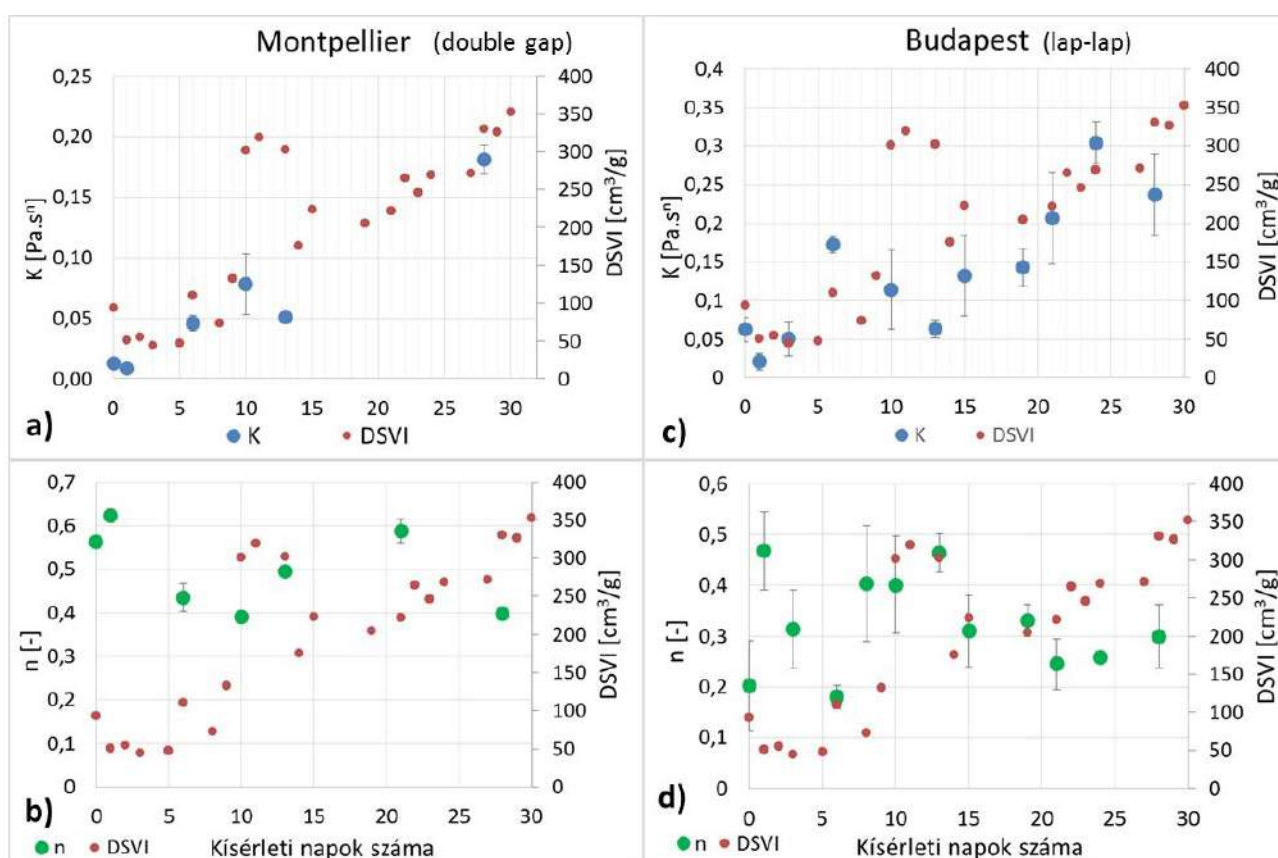


6. ábra: Az eleveniszap pehelyszerkezeti összetételének alakulása a *Fonalas rendszerben*

A reológiai vizsgálatok eredményeit a **7. és 8. ábrák** diagramjai foglalják össze. Az eredmények azt mutatják, hogy a vizsgált viszkozitás tartomány esetében a „double gap” mérőfejjel pontosabb, megbízhatóbb eredmények kaphatók, a minden esetben három párhuzamos minta eredményéből kapott szórások a konzisztencia koeficiens (K) és a folyási indexek (n) esetében is jóval nagyobbak adódtak lap-lap lerendezés alkalmazásával.

A **7. ábra a) és c)** diagramjai azt mutatják, hogy az *EPS* termelő rendszerben, azaz viszkozus

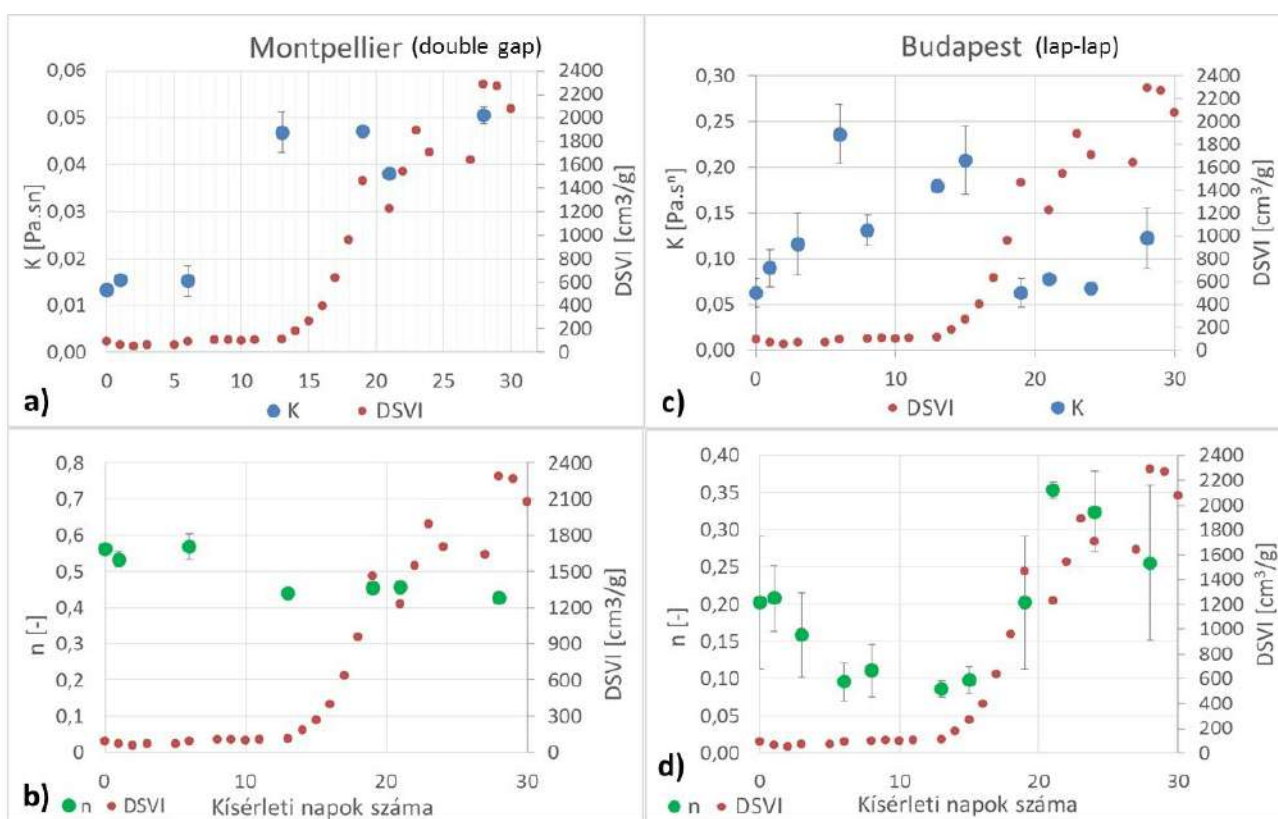
iszappuffadás esetén az iszap ülepedési index növekedésével jól láthatóan a K is nagymértékben növekszik (amit a lap-lap elrendezéssel mért eredmények is jól mutatnak), a kísérlet végére egy nagyságrenddel nagyobbak adódtak a kiindulási értéknél, ami arra utal, hogy a szuszpenzió szerkezete komplexebbé, állaga közel gélszerűvé válhatott. A **7. b)** és **d)** ábrák ugyanakkor arról tanúskodnak, hogy az extracelluláris poliszacharid felhalmozódásával a folyási indexek változásában nem figyelhető meg egyértelmű tendencia.



7. ábra: A reológiai vizsgálati eredmények és az iszap ülepedési index alakulása az *EPS* termelő rendszerben: a) és b): a „double gap” mérőfejjel mért konzisztencia koeficiens és folyási index; c) és d): a lap-lap mérőfejjel mért konzisztencia koeficiens és folyási index.

Amint azt a **8. a) és b) ábrák** diagramjai szemléltetik, a *Fonalas rendszer* esetében a kis viszkozitás miatt lap-lap elrendezéssel nem mutatható ki egyértelmű tendencia a K alakulásában, míg „double gap” mérőfejjel ez esetben is megfigyelhető a K növekedése az iszap ülepedési index növekedésével. A kísérlet végére a K a kiindulási érték kb. 5-szörösére emelkedett, ez a növekedés a DSVI sokkal

nagyobb mértékű megnövekedése ellenére kisebb mértékű, mint az EPS termelő rendszerben (vö. **7. a. ábra**: a K kb. 10-szeresére nő). A „double gap” mérőfejjel mért folyási index értékek ugyan kb. 20%-os csökkenést mutatnak az iszap ülepedhetőségének romlásával, de ezt egyértelműen megállapítani csak jóval több mérési adat tükrében lehetne.



8. ábra: A reológiai vizsgálati eredmények és az iszap ülepedési index alakulása a *Fonalas rendszerben*:
a) és b): a „double gap” mérőfejjel mért konzisztencia koefficiens és folyási index;
c) és d): a lap-lap mérőfejjel mért konzisztencia koefficiens és folyási index.

KÖVETKEZTETÉSEK

Folytonos üzemű laboratóriumi modellkísérletben tápanyaghiányos szennyvízzel teljesen aerob rendszerben sikerült előidézni az eleveniszap viszkózus iszappuffadását (*EPS termelő rendszer*), míg low S – low DO körülmények között nagymértékű fonalasodást értünk el (*Fonalas rendszer*). Mindkét kísérleti rendszerben 30 nap elteltével ülepíthetetlené vált a biomassa, felteltek az utóülepítők és iszapelúszás következett be.

A *Fonalas rendszer* eleveniszapja a kísérlet végére 90%-ban fonalas szervezeteket tartalmazott, amelyért elsősorban a *Type 021N* és *Thiothrix* fajok nagyszámú jelenléte volt felelős.

A 3,5 g/l iszapkoncentráció mellett végzett reológiai vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a vizsgált viszkozitás tartományban a „double gap” (koncentrikus henger) mérőfejjel végzett mérések megbízhatóbbak a laplap elrendezésnél. A mérési eredmények arról tanúskodtak, hogy a viszkózus iszappuffadás a konzisztencia koefficiens jóval nagyobb mértékű (kb. 10-szeres) növekedését okozza, mint a fonalasok gyakoriságának drasztikus növekedése, amely esetén csak kb. 5-szörös növekedés volt megfigyelhető. Az iszap szerkezet változások hatására a folyási indexben

egyértelmű trendszerű változás nem volt megállapítható.

A kutatás keretében kapott eredmények jó eszközül szolgálhatnak az eleveniszap szerkezet változások reológiai nyomon követésére, valamint a nagy energia-felhasználású és/vagy biomassa elválasztási problémákkal küzdő eleveniszapos rendszerek költségkímélő hatékonyság növelésére.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás eredményei a *TÉT_14_FR-1-2015-0033* sz. Magyar-Francia Kétoldalú Tudományos és Technológiai Együttműködés keretében jöhetnek létre a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, valamint a Campus France anyagi támogatásával. Köszönet Dr. Jobbágy Andrea c. egyetemi tanárnak, a BME ABÉT Szennyvíztisztítási biotechnológiák kutatócsoport vezetőjének, hogy építhettünk a kialakított berendezés parkra, kifejlesztett kísérleti technikára és az átadott széleskörű tapasztalatokra; és Dr. Szilágyi András egyetemi docensnek, a BME FKAT kutatócsoport vezetőjének, hogy rendelkezésünkre bocsátotta a reológiai vizsgálatok helyszínéül szolgáló laboratóriumot és a mérőberendezést.

IRODALOMJEGYZÉK

1. Bakos, V., Gyarmati, B., Vachoud, L., Kovács, R., Cifka, F., Wisniewski, C. (2017): Az eleveniszap reológiai tulajdonságainak vizsgálata az iszap pehely szerkezet és ülephetőség függvényében. MaSzeSz HÍRCSATORNA, 2017/5. szám, pp. 17-24.
2. Bakos, V., Kiss, B., Jobbágy, A. (2016): Problems and causes of marginal nutrient availability in winery wastewater treatment. *Acta Alimentaria*, 45(4), pp. 532–541.
3. Eshtiaghi, N., Markis, F., Yap, S.D., Baudez, J-C., Slatter, P. (2013): Rheological characterization of municipal sludge: a review. *Water Research*, 47, pp. 5493–5510.
4. Jenkins, D., Richard, M.G., Daigger, G.T. (2004): *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming*. 3rd edition., CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, US.
5. Khongnakorn, W., Mori, M., Vachoud, L., Delalande, M., Wisniewski, C. (2010): Rheological properties of sMBR sludge under unsteady state conditions. *Desalination*, 250(2), pp. 824–828.
6. Kovács, R.T. (2017): Az eleveniszap szerkezetének és reológiai tulajdonságainak vizsgálata súlyos tápanyaghiány esetén, Diplomamunka, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszék, Budapest, 2017. június. Témavezető: Dr. Bakos Vince.
7. Nagy, E. (2017): Az eleveniszap pehelyszerkezetének és reológiai tulajdonságainak vizsgálata low S – low DO körülmények között, valamint súlyos tápanyaghiány esetén folytonos üzemű összehasonlító laboratóriumi modellkísérletekben, TDK dolgozat, BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszék, Budapest, 2017. október. Témavezető: Dr. Bakos Vince.
8. Nagy Göde, P. (2010): Az eleveniszap szerkezetének jellemzése képelemző program segítségével – *Vízmű Panoráma* 18. évf. 8. sz., pp. 22-23.
9. Ratkovich, N., Horn, W., Helmus F.P., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I., Bentzen, T.R. (2013): Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling. *Water Research*, 47(2), pp. 463-482.
10. Seyssiecq, I., Ferrasse, J-H., Roche, N. (2003): State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 16, pp. 41-56.