

Eleveniszap reológiai tulajdonságainak hatása a csővezetékrendszer hidraulikai ellenállására

The effect of activated sludge's rheology on pressure losses of the pipeline system

Dr. CSIZMADIA Péter¹, TILL Sára¹, Dr. BAKOS Vince², Dr. GYARMATI Benjámín³

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3., tel.: +36-1-463-16-80, www.hds.bme.hu
e-mail: pcsizmadia@hds.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék, H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3., tel.: +36-1-463-12-55, <http://biokemia.bme.hu>

³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Lágyszövet Kutatócsoport (Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék), H-1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3., tel.: +36-1-463-35-18, <http://softmatters.bme.hu/>

Abstract

A significant part of the electricity on our earth is used to pump water and wastewater. The present work examines the flow properties of activated sludge fluid used in municipal wastewater treatment plants. Based on the CFD results, we examine the significant sources of losses in the systems, such as those caused by straight pipe sections and a selected pipe with an $R/D = 1$ relative curvature. We present the difference between the specific pressure losses of the element with the power-law, the Bingham plastic and Herschel-Bulkley model.

Keywords: CFD simulation, elbow, non-Newtonian fluid, rheology, loss coefficient

Kivonat

Földünkön megtermelt villamos energia egy jelentős része a víz és szennyvíz szivattyúzásra fordítódik. Jelen munkánkban a szennyvíztisztító telepeken alkalmazott eleveniszap közegek áramlási tulajdonságait vesszük górcső alá. A CFD eredmények alapján vizsgáljuk az egyenes csőszakaszok, illetve egy kiválasztott, $R/D = 1$ -es relatív görbületű csőkönyök okozta veszteségeket. A hatványfüggvény szerint viselkedő, a Bingham plasztikus és a Herschel-Bulkley-t anyagmodellt is elemezve kitérünk a fajlagos nyomásesés közötti különbségekre.

Kulcsszavak: CFD szimuláció, csőkönyök, nemnewtoni közeg, reológia, veszteségtényező

1. BEVEZETÉS

A víz- és szennyvízipar villamosenergia felhasználása óriási, ezen energia egy jelentős részét a szennyvíztisztító telepeken is szivattyúzási feladatokra használják [1]. Amennyiben ezeket a rendszereket gondosan tervezzük és üzemeltetjük, a rendszerek energiahatékonysága növelhető. Napjainkban egyik leggyakrabban alkalmazott szennyvízkezelési technológia az eleveniszapos eljárás. Az eleveniszap, amit az iszap recirkulációs körben szivattyúval szállítanak a csővezeték rendszerben, nemnewtoni reológiai tulajdonságú közeg.

Az eleveniszap pehelyszerkezetében nem megfelelően kialakított és/vagy üzemeltetett technológia során kedvezőtlen változások mehetnek végbe [2][3]. Kutatásunk elején azzal a hipotézissel éltünk, hogy a nemkívánatos iszapszerkezet változások a rossz ülepezettség mellett az áramlási tulajdonságokra is kedvezőtlen hatással lehetnek a reológiai tulajdonságok megváltozása miatt. A BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karán folyó átfogó kutatásban sikeresen végeztünk modellkísérletet a szennyvíziszap fonalas és viszkózus iszappuffadását előidézve. A 30 napos kísérlet folyamán nemcsak az iszap szuszpenzióban végbemenő szerkezeti változásokat, hanem az anyag reológiai tulajdonságait is meghatároztuk [4]. A

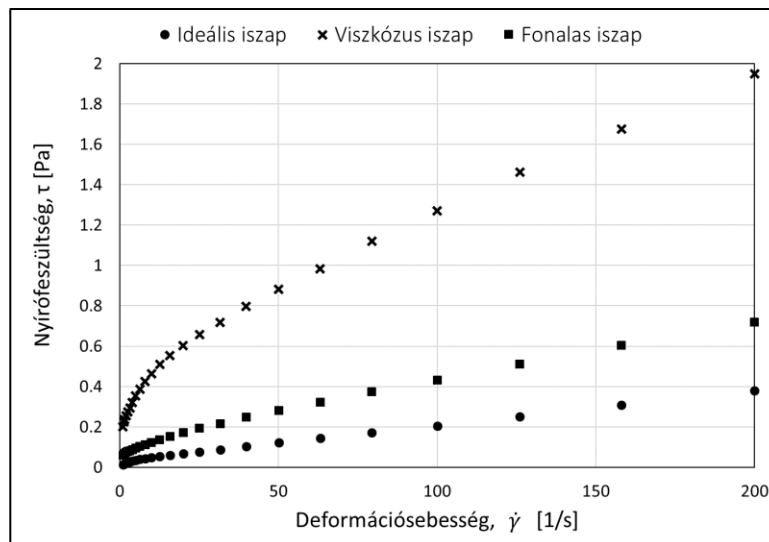
szennyvíziszap reológiáját többek között szokás a hatványfüggvény (Power-law, PL), a Bingham (B) és a Herschel-Bulkley (HB) anyagmodellekkel leírni [5][6][7].

Munkánkban a fenti három anyagmodell használatával numerikus áramlástan (CFD) szimulációkat végeztünk egyenes cső és csőkönyök veszteségeinek meghatározására. Az elemek fajlagos nyomásesését elemezve vizsgáltuk, hogy van-e lényeges különbség a veszteségekben a különböző anyagszerkezetű anyagok esetében, illetve hogy a választott anyagmodellnek van-e hatása a becslés eredményeire.

2. MODELLEZÉS

2.1. Eleveniszap reológia

Ideális iszapszerkezetből kiindulva, párhuzamos laboratóriumi kisminta kísérletekben viszkózus és fonalas iszappuffadást állítottunk elő bioreaktorokban. A kísérlet elején az ideális, jól ülepedhető iszap, majd a végén a viszkózus és fonalas szerkezetű anyag reológiai paramétereit Anton Paar Physica MCR 301 típusú reométerrel határoztuk meg. A mérések eredményeül kapott reogramok láthatók az 1. ábrán. A mért alakváltozási sebesség-csúsztatófeszültség görbékre a hatványfüggvény, a Bingham- és a Herschel-Bulkley modelleket illesztettük. A pontos anyagtulajdonságok és az illesztés determinációs együtthatói megtalálhatók korábbi munkánkban [4].



1. ábra. Az ideális, viszkózus és fonalas szerkezetű iszap reogramjai.

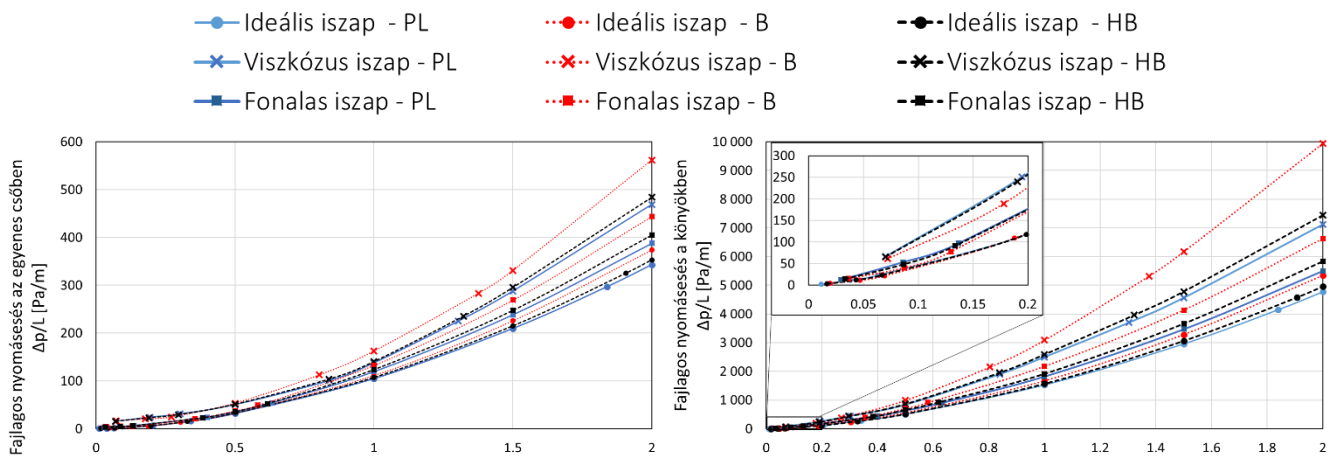
2.2. CFD számítások

A numerikus modellezést ANSYS-CFX szoftver segítségével végeztük el [8]. A geometria $D = 0,1$ m belső átmérőjű $50D$ hosszúságú egyenes belépő csőszakaszból, az $R/D = 1$ görbületű csőkönyökből és egy kilépő $10D$ hosszúságú egyenes csőszakaszból állt, ahol R [m] a görbület sugara. Teljesen strukturált, háromdimenziós O-grid típusú hálót készítettünk, a falnál megfelelő sűrítéssel. Turbulens belépő sebességprofil és konstans statikus nyomást alkalmaztunk belépő és kilépő peremfeltételként. A cső fala hidraulikailag sima volt, a turbulencia leírására az SST modellt használtuk [9]. A CFD számítások részletei megtalálhatók a [4][9][10] forrásokban. A szimulációkat a mérnöki releváns $v = 0 - 10$ m/s áramlási átlagsebesség tartományban, több pontban mindhárom anyaggal elvégeztük, mindhárom illesztett reológiai modellt használva.

Az egyenes csőszakasz fajlagos nyomásesését a $\Delta p_{cső}/L = f/D \cdot \rho/2 \cdot v^2$ képlettel, a csőkönyök fajlagos nyomásesését a $\Delta p_{könyök}/L = \xi/L_{könyök} \cdot \rho/2 \cdot v^2$ összefüggéssel számoltuk [11] a szimulációs eredményekből, ahol f [-] a csőúrlódási tényező, D [m] a cső belső átmérője, ρ [kg/m³] a közeg sűrűsége, v [m/s] az átlagsebesség, ξ [-] a könyök veszteségtényezője, $L_{könyök} = 2R\pi/4$ [m] pedig a negyedkörív hossza.

3. EREDMÉNYEK

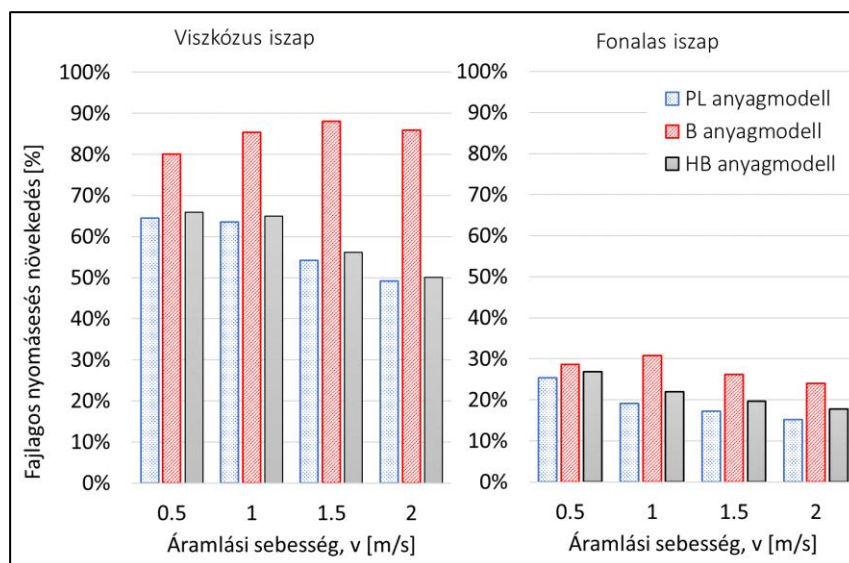
A CFD számítások eredményeként meghatároztuk az egyenes csőszakaszok és a modellezett $R/D = 1$ relatív görbületi sugarú csőkönyök fajlagos nyomásesését, ezek láthatók a sebesség függvényében a 2. ábrán.



2. ábra: Fajlagos nyomásesés az egyenes csőben (bal) és a csőkönyökben (jobb) az áramlási átlagsebesség függvényében a hatványfüggvény (PL), a Bingham-modell (B) és a Herschel-Bulkley-modell (HB) alapján számolt folyási tulajdonságokkal

A reológiai modell az egyenes cső becsült fajlagos nyomásesését maximum 10% relatív szórással befolyásolta, így kijelenthető, hogy az anyagmodell választása itt kevésbé szignifikáns. A csőkönyökben folyó áramlásnál viszont a viszkózus anyag esetében nem elhanyagolható az, hogy melyik anyagmodellt használjuk, mert akár 19% is lehet a relatív szóródás az eredményekben.

A referencia iszap ideálisnak tekinthető anyagszerkezet és ülephetőség tekintetében. A viszkózus iszap puffadással megváltozott szerkezet akár 80% fajlagos nyomásesés növekedést eredményezhet ehhez képest a csőkönyökben, 60%-ost az egyenes csőben. A fonalasodás jóval kevésbé kockázatosabb hidrodinamikai értelemben az energiaszükséglet szempontjából, hiszen itt maximum 20-30%-ot növekszik a fajlagos nyomásesés. Ez azt is jelenti, hogy amennyiben a szennyvíztisztító telep iszaprecirkulációs körén adott térfogatáram csak nagyobb teljesítménnyel valósítható meg, mint normál üzemben (jól ülepedő iszap esetén), akkor valószínűsíthető a kedvezőtlen iszapszerkezeti átalakulás. A csőkönyök fajlagos nyomásesés növekedése az anyagszerkezet megváltozásának hatására viszkózus és fonalas esetben a 3. ábrán látható rendre $v = 0,5; 1; 1,5$ és 2 m/s sebesség értékek mellett.



3. ábra: Fajlagos nyomásesés növekedés a csőkönyökben az áramlási átlagsebesség függvényében a hatványfüggvény (PL), a Bingham-modell (B) és a Herschel-Bulkley-modell (HB) alapján számolt folyási tulajdonságokkal

Az anyagmodellek összehasonlításánál megemlíthető továbbá, hogy a Herschel-Bulkley és a hatványfüggvény modell használatával számolt veszteségek a legtöbb esetben közel álltak egymáshoz, a Bingham-modell viszont ezektől eltérő, nagyobb nyomásvesztéseket eredményezett a vizsgált

sebességtartományban. Mivel ennek oka lehet a reológiai illesztés alacsonyabb determinációs együtthatója [4], a másik két anyagmodell eredményei tekinthetők relevánsnak.

4. ÖSSZEGZÉS

Ismert, hogy a szennyvíziszap folyási tulajdonságait az oldott szárazanyag tartalom, a koncentráció és a hőmérséklet, nagyban befolyásolja. Az azonban kevésbé, hogy amennyiben az előbb említett paramétereket konstans értéken tartjuk, kizárólag az anyagszerkezetben (t.i. eleveniszap pehelyszerkezetben) bekövetkező változások miatt, a technológia folyamán is megváltozhat a reológia. Így az anyagot szállító rendszer hidraulikai veszteségei is módosulnak. Munkánkban három általunk előállított, valós eleveniszapot (ideálist, viszkózus és fonalas szerkezetűt) vizsgáltunk három különböző nemnewtoni anyagmodellel. CFD szimulációkat végezve megállapítottuk, hogy a viszkózus iszappuffadás jelentős fajlagos nyomásesés növekedést okozhat egy csőkönyök esetében. Így ez nemcsak ülepíthetőség tekintetében, de hidraulikai szempontból is kerülendő.

Elmondható továbbá, hogy míg az egyenes csőnél nem, viszont a csőív modellezése estén a nemnewtoni modell helyes megválasztása is lényeges lehet a rendszer méretezése szempontjából. A munkánk alapján a három anyagmodell közül a Bingham-modellt helyett a hatványfüggvény és a Herschel-Bulkley anyagmodell használatát javasoljuk eleveniszap reológiai modellezésére.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka Dr. Csizmadia Péter által elnyert, az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-5 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Plappally, A. K., Lienhard V, J. H. "Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), pp. 4818–4848. 2012. DOI:10.1016/j.rser.2012.05.022
- [2] Wanner, J., Jobbágy, A. "Activated sludge solids separations". In *Activated sludge - 100 years and counting* (pp. 171–194). Glasgow, UK: IWA Publishing. 2014.
- [3] Bakos, V., Kiss, B., Jobbágy, A. "Problems and causes of marginal nutrient availability in winery wastewater treatment". *Acta Alimentaria*, 45(4), pp. 532–541. 2016. DOI:10.1556/066.2016.45.4.10
- [4] Bakos, V., Gyarmati, B., Csizmadia, P., Till, S., Vachoud, L., Göde, P. N., ... Wisniewski, C. "Viscous and filamentous bulking in activated sludge: Rheological and hydrodynamic modelling based on experimental data". *Water Research*, 214, pp. 118155. 2022. DOI:10.1016/j.watres.2022.118155
- [5] Baroutian, S., Eshtiaghi, N., Gapes, D. J. "Rheology of a primary and secondary sewage sludge mixture: Dependency on temperature and solid concentration". *Bioresource Technology*, 140, pp. 227–233. 2013. DOI:10.1016/j.biortech.2013.04.114
- [6] Ratkovich, N., Horn, W., Helmus, F. P., Rosenberger, S., Naessens, W., Nopens, I., Bentzen, T. R. "Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling". *Water Research*, 47(2), pp. 463–482. 2013. DOI:10.1016/j.watres.2012.11.021
- [7] Eshtiaghi, N., Markis, F., Yap, S. D., Baudez, J. C., Slatter, P. "Rheological characterisation of municipal sludge: A review". *Water Research*, 47(15), pp. 5493–5510. 2013. DOI:10.1016/j.watres.2013.07.001
- [8] Ansys, C. "ANSYS CFX-solver theory guide". *ANSYS CFX Release*, 15317(April), pp. 724–746. 2009. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.009
- [9] Csizmadia, P., Hős, Cs. "CFD-based estimation and experiments on the loss coefficient for Bingham and power-law fluids through diffusers and elbows". *Computers and Fluids*, 99, pp. 116–123. 2014. DOI:10.1016/j.compfluid.2014.04.004
- [10] Csizmadia, P., Till, S. "The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow". *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(4), pp. 305–311. 2018. DOI:10.3311/PPme.12348
- [11] Monteiro, A. C. S., Bansal, P. K. "Pressure drop characteristics and rheological modeling of ice slurry flow in pipes". *International Journal of Refrigeration*, 33(8), pp. 1523–1532. 2010. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2010.09.009