



KLOKNICER TAMÁS<sup>1,2,3</sup>  
kutató/szakértő



SÁNDOR DÁNIEL  
BENJAMIN<sup>1</sup>  
K+F igazgató



DR. SZABÓ ANITA<sup>1,2</sup>  
vezérigazgató

1: Inno-Water Zrt.;  
2: Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola;  
3: Óbudai Egyetem Környezetmérnöki és Természettudományi  
Intézet

tkloknicer@gmail.com  
sander.daniel@innowater.hu  
szabo.anita@innowater.hu

**KIVONAT:** A biológiai szennyvíztisztításban az egyik leghatékonyabb a mozgóágyas biofilmes tisztítás. A hordozóanyag a legtöbb esetben valamilyen műanyag, mérettartománya pedig 2-70 mm közé tehető. Legfontosabb paraméterük a fajlagos felület, mely 78 és 5500 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> között alakul. Mind a fizikai méretek, mind pedig a fajlagos felület egy dologhoz vezet: a biofilmes mikroorganizmusok számára megfelelő környezetet teremteni a szennyvíz megtisztításához. Léteznek a hagyományos hordozóanyagoknál kisebb méretűek, melyek alapanyaga gyakran PVA. Ezek mérettartománya 200 µm és 4mm között van. A rendkívül kis átmérőnek köszönhetően magasabb fajlagos felülettel rendelkeznek, mely nagyobb biomassza tömeget, jobb tisztítási hatékonyságot, és jobb ellenállóképességet jelent. Az általunk fejlesztett MICROBI technológia esetében a hidrogélek mérete változó, 293 és 1362 µm között alakul, fajlagos felülete ~ 63000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. A kis méret azonban több kihívást jelent a biofilm és a hordozó elválasztását illetően, mely azonban elengedhetetlen bizonyos technológiai számításokhoz.

**KULCSSZAVAK:** MBBR, szennyvíztisztítás, hordozóanyag, biofilm

## AKTUÁLIS

# A mozgóágyas biofilmes tisztítás és a MICROBI: kihívások a biofilm vastagság számításban

## BEVEZETÉS

A biológiai szennyvíztisztítás a XX. század elején látott napvilágot, melynek már akkor több típusa volt ismert, köztük eleveniszapos, illetve csepegtetőtestet eljárások (Förstner, 1993). Az eleveniszapos eljárás során a tisztítást olyan mikroorganizmusok végzik, melyek szabadon, illetve pelyhes formában találhatók meg. Egy pehely lényegében keveréke a szubsztrátoknak, a különféle fonalas és sejtes mikroorganizmusoknak, illetve azok kolóniáinak (Rieger et al, 2012).

A biofilmes rendszerek esetén a tisztítás alapja egy olyan mikro-organizmus közösség, ami valamilyen hordozó anyaghoz rögzült életmódot folytat. Ennek következtében a helyhez kötött mikro-organizmusok sokkal stabilabb kultúrát képesek kialakítani, mint pelyhes társaik. A stabilabb szerkezet egy tömör, vastag biofilm szerkezetet eredményez, amely ellenállóbb az egyes környezeti hatásokkal szemben, jobban viseli a terhelés ingadozását, illetve a biofilmes rendszerek esetében hatékonyabbak az egyes mikroorganizmusok közötti együttműködések, mint például az exoenzimekkel történő szubsztrát bontás (Barwal & Chaudhary, 2014). A biofilmnek valamilyen módon rögzülnie kell egy felülethez, melynek legelső lépése a fehérjék adszorbeálódása az adott anyagon. A fehérjék - köszönhetően változatos felépítésüknek - a leginkább felületaktív biopolimerek. Rendelkeznek hidrofób, hidrophil, poláros és apoláris szakaszokkal, melynek következtében gyakorlatilag bármilyen felülethez képesek kötődni. Mivel ezek a szakaszok általában váltakoznak a fehérjék felületén, így egyszerre több ponton is képesek kötődni. Miután megtörtént a

fehérje adszorpció, a szerkezete átrendeződik olyan formára, hogy a fehérjékhez már könnyedén kötődjenek mikroorganizmusok (Hladi és Bujis, 1996). A biofilm növekedésének a szakirodalom általában öt fázisát különbözteti el: a kezdeti kötődés fázisát, az irreverzibilis kötődést, a növekedés első és második fázisát, valamint az érett biofilm terjedését, illetve leszakadását (Kaplan et al., 2003).

## A BIOFILMES RENDSZEREK TÍPUSAI

A biofilmes rendszerek közül elsőként a fixfilmes rendszerek jelentek meg. Ennek több formája létezik, az egyik, talán legelterjedtebb korai típus a csepegtetőtestes rendszer. Lényege, hogy egy hordozóanyaggal töltött reaktoron keresztül áramlik a tisztítandó szennyvíz, melyben helyhez kötött organizmusok végzik a tisztítási folyamatot. Általában aerob rendszerekről beszélünk, és a levegőztetési igénye alacsony, mivel sok esetben nem telített a rendszer. A biofilm növekedésének évszakos változása ismert, télen megvastagodik, míg tavasszal a letapadt biofilm gyakran felszakadozik. Olyan esetekben alkalmas tisztítási forma, ahol alacsony a lebegőanyag tartalom, és magas az oldott BOI (>500 mg/l) koncentráció (Ibrahim et al, 2012).

További elterjedt biofilmes tisztítási módszer a forgó-merülő tárcsás biológiai szennyvíztisztítás. A technológia lényege, hogy több vékony tárcsa kerül egymás mellett elhelyezésre, melyet egy kis villanymotor forgat lassan egy medencében, melybe szennyvíz került bevezetésre. A kezdetekben a tárcsákat fából, majd műanyagból készítették (wapp.hu). A műanyag lehet MDPE, PVC, de alkalmazhatnak fém, illetve azbesztcement tárcsákat is.

Egy ilyen rendszer fajlagos felülete 150-200 m²/m³ között alakul. A tárcsák 40-50 %-a van folyamatosan víz alatt, e fölött kiegészítő levegőztetés szükséges (Ibrahim et al, 2012).

Mindkét biofilmes rendszer esetében probléma, hogy a fajlagos felület alacsony, így nem képesek nagy mennyiségű biofilm hordozására. Az 1980-as évektől jelentős fejlődésnek indultak az anyag-tudományok, illetve a műanyag gyártás, melynek köszönhetően sokkal finomabb felületű, illetve szerkezetű hordozóanyagokat tudtak létrehozni. Ennek eredménye, hogy a fajlagos felületet úgy tudták tovább növelni, hogy az nem okozott eltömődést a biofilm növekedésével. Ezzel, illetve a teljes hordozóanyag víz alá vitelével elérhető 3500 m²/m³ fajlagos felület, 30-40 000 mg/l-es biomassa koncentráció (Ibrahim et al, 2012).

MOZGÓÁGYAS BIOFILMES HORDOZÓANYAGOK

A fixágyas biofilmes rendszerek mellett megjelentek az olyan rendszerek is, melyekben a hordozóanyag nem rögzült, tehát lebegő, mozgó állapotban van a biológiai medencékben. Ezt a technológiát a szakirodalom MBBR-nek (Moving Bed Biofilm Reactor), azaz mozgóágyas biofilm tisztításnak nevezi. A technológia előnye a gyorsabb ülepedés, stabilabb organizmus közösség és csökkentett fölösizap képződés (Metcalf & Eddy, 2003). Az MBBR technológia esetében változatos lehet a hordozóanyag mind méretben, mind pedig alapanyag tekintetében. Utóbbit tekintve HDPE, PE és PP a legelterjedtebb alapanyag. Fajlagos felületük változó lehet, melyek értékeit az egyes típusokkal a következő táblázat tartalmazza.

| Gyártó                            | Modell                 | Átmérő [mm] | Vastagság [mm] | Felület [m²/m³] | Védett felület [m²/m³] |
|-----------------------------------|------------------------|-------------|----------------|-----------------|------------------------|
| Kaldnes<br>(Ramussen 2011)        | K1                     | 10          | 7              |                 | 500                    |
|                                   | K2                     | 15          | 15             |                 | 350                    |
|                                   | K3                     | 25          | 10             |                 | 350                    |
|                                   | Natrix Media           | 60          | 50             |                 | 310                    |
|                                   | Biofilm Chip M         | 45          | 3              |                 | 900                    |
| ztsmallboss<br>(ztsmallboss.com)  | Biochip szennyvíz      | 25          | 1,1            | 800             | -                      |
|                                   | PE05                   | 25          | 10             | 600             | -                      |
|                                   | PE38                   | 25          | 10             | 800             | -                      |
|                                   | PE75s                  | 25          | 4              | 1600            | -                      |
|                                   | PE75                   | 25          | 4              | 1600            | -                      |
|                                   | PE09                   | 25          | 5              | 900             | -                      |
|                                   | PE64s                  | 25          | 4              | 1000            | -                      |
|                                   | PE04                   | 16          | 10             | 800             | -                      |
|                                   | PE08                   | 5           | 10             | 3500            | -                      |
|                                   | PE03                   | 10          | 7              | 1000            | -                      |
|                                   | PE02                   | 11          | 7              | 900             | -                      |
|                                   | PE01                   | 12          | 9              | 800             | -                      |
|                                   | Biochip recirkuláció   | 30          | 1,1            | 5500            | -                      |
| SSI Aeration<br>(ssiaeration.com) | EEVE675                | 25          | 12             | 675             | -                      |
|                                   | EEVE700                | 25          | 12             | 700             | -                      |
|                                   | EEVE870                | 25          | 12             | 870             | -                      |
| Hel-X<br>(hel-x.eu)               | HX09KL                 | 9           | 7              | 836             | 495                    |
|                                   | HX09                   | 9           | 7              | 861             | 461                    |
|                                   | HX75                   | 75          | 75             | 78              | 66                     |
|                                   | HX75K                  | 75          | 75             | 84              | 69                     |
|                                   | HX65                   | 65          | 65             | 102             | 85                     |
|                                   | HX65K                  | 65          | 65             | 96              | 78                     |
|                                   | HX50                   | 50          | 50             | 148             | 125                    |
|                                   | HX38                   | 38          | 38             | 188             | 141                    |
|                                   | HX38K                  | 38          | 38             | 195             | 149                    |
|                                   | H2X36glatt             | 36          | 36             | 322             | 268                    |
|                                   | H2X36                  | 35          | 36             | 239             | 188                    |
|                                   | HX25                   | 25          | 25             | 312             | 226                    |
|                                   | HX25KLL                | 25          | 25             | 360             | 273                    |
|                                   | HXF25KLL               | 25          | 25             | 420             | 342                    |
|                                   | HX18KK                 | 18          | 18             | 475             | 304                    |
|                                   | HXF18KK                | 18          | 18             | 492             | 387                    |
|                                   | HX17KL                 | 17          | 15             | 437             | 264                    |
|                                   | HX17KLL                | 17          | 17             | 602             | 393                    |
|                                   | HXF17KLL               | 17          | 17             | 595             | 496                    |
|                                   | HXF14KLL               | 14          | 14             | 767             | 644                    |
|                                   | HXF13KLL+              | 13          | 13             | 955             | 806                    |
|                                   | HXF12KLL               | 12          | 12             | 859             | 704                    |
|                                   | HEL-X FLAKE 30         | 30          | 1,1            | 5000            | -                      |
|                                   | HEL-X FLAKE Pro        | 30          | 1,2            | 5500            | -                      |
| bio-Fil<br>(bio-fil.es)           | TYPE C                 | 28          |                | 460             | -                      |
|                                   | TYPE CT                | 28          |                | 460             | -                      |
|                                   | TYPE C-2               | 25          |                | 590             | -                      |
|                                   | TYPE C-2T              | 25          |                | 590             | -                      |
| Mutag (mutag.com)                 | MUTAG Biochip          | 30          | 1,1            | 4000            | -                      |
| Nexom<br>(nexom.com)              | BioPorts Media: 600-14 | 18          | 14             | 589             | -                      |
|                                   | BioPorts Media: 900-09 | 17-20       | 9              | 942             | -                      |

1. táblázat: MBBR hordozóanyagok technikai paraméterei

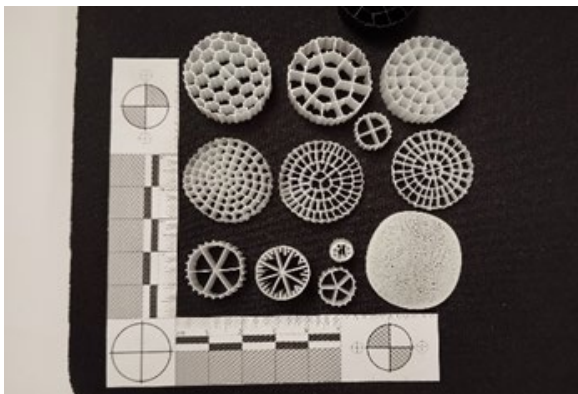
A fenti táblázat alapján is érzékelhető, hogy változatos méret-tartománnyal, illetve kapacitással rendelkeznek az egyes hordozóanyagok. Mérettartományuk a néhány milliméteresig terjed, valamint legnagyobb fajlagos felületük  $5500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Az egyes biofilm hordozókról készült képeket a **1-3. ábrákon** szemléltetjük.



1. ábra: HeliX hordozó



2. ábra: Mutag hordozó



3. ábra: Small Boss hordozó

Több carrier esetében beszélhetünk védett részekről, melyeket az egyes gyártók azért fejlesztettek ki, hogy a biofilm azokon a részekén védetten növekedhessen, a keverés és a levegőztetés, valamint a hordozók egymással történő érintkezése miatt keletkező nyíróerők ne roncsolják a kialakult biofilmet.

## MIKROSKÓPIKUS BIOFILM HORDOZÓK

A hagyományos carrierek mellett léteznek más hordozó anyagok is, melyek célja elsősorban a fajlagos felület további növelése. A NUVODA amerikai cég által készített Kenaf nevezetű mikro-hordozót rostmályvából készítik, a hordozó maga lényegében lignocellulóz. Az egyes szemcsék mérettartománya 600 és  $1400 \mu\text{m}$  közé tehető, mellyel a fajlagos felület  $20\,000$  és  $463\,000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  között alakul (Wei et al, 2021).

Wang és munkatársai 2017-es munkásságukban  $4 \text{ mm}$  átmérőjű, PVA alapú hidrogéleket alkalmaztak a szennyvíztisztítási kísérleteikben, melyekben 65-85%-os KOI, 59-98%-os ammónium eltávolítási hatékonyságot értek el. Hasonló hidrogélekkel végeztek kísérleteket, ahol 12 literes reaktorokban végeztek kísérletet. Eredményeik szerint 90% KOI eltávolítási hatékonyságot értek el, amennyiben a KOI értéke nem haladta meg a  $1,5 \text{ g/l}$  értéket. E mellé 45%-os összes nitrogén eltávolítási hatékonyság társult  $0,117$ - $0,551 \text{ g/l}$  TN koncentráció mellett (Chen et al, 1998).

Egy 2019. évi tanulmányban PVA és PEG keverékét alkalmazzák, mint szennyvíztisztító mikroorganizmus hordozóanyag. Vizsgálataik során a 20-15-ös PVA-PEG arány esetében a fajlagos felület  $69,86 \text{ m}^2/\text{g}$  volt, míg a sűrűség  $0,83$  és  $1,08 \text{ g/cm}^3$  között alakult. Ez átszámítva  $57,98$ - $75,45 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  térfogatra viszonyított fajlagos felületet jelent (Shin et al, 2019). A hordozó átmérője  $10,85 \text{ mm}$  és  $12,79 \text{ mm}$  között alakult. A felület számítások itt már tartalmazzák a hordozók pórusai által hozzáadott felületet, nem pedig pusztán annak geometriája (határolófelülete) alapján került kiszámításra.

Surkatti és munkatársai (2024) PVA alapú hidrogélt állítottak elő, melyhez Vas-oxid ( $\text{Fe}_3\text{O}_2$ ) és Titán-oxidot adtak hozzá ( $\text{TiO}_2$ ) különböző mértékben. A polimerizációs folyamat során PVA oldathoz adtak különböző mennyiségben az említett fém vegyületekből, majd melegítették ( $70$ - $80^\circ\text{C}$ ) és lehűtötték ( $-20^\circ\text{C}$ ), hogy a megfelelő számú keresztkötés alakuljon ki a molekulák között.

A folyamat iniciátora bórsav volt. Hassan és Peppas (2000) szerint a mikroorganizmusok és a stabilitás szempontjából a kémiai polimerizáció a preferált, így ők is ezt a módszert alkalmazták. Anyagkutatási eredményeik szerint a titán-oxid alkalmazása növeli a hidrogélek szerkezeti ellenállását.

Hou és munkatársai (2020) PVA alapú hidrogéleket állítottak elő ciklodextrin mellett történő polimerizáció során. A különböző típusú hidrogéljeik tömegre vetített fajlagos felülete  $27,77$  és  $29,96 \text{ m}^2/\text{g}$  között alakult.

Chen és munkatársai (1998) SEM mikroszkóppal vizsgáltak PVA alapú hidrogélek felületét, miközben szennyvíztisztítási kísérleteket hajtottak végre. A mikroszkópos képkészítésen kívül azonban nem végeztek biofilm elemzéseket.

Egy kutatásban  $4 \text{ mm}$ -es hidrogélek felületét vizsgálták SEM mikroszkóppal, mely során nem végeztek biofilm vastagságra vonatkozó vizsgálatokat. Ezzel szemben DNS szekvenálást folytattak D5625 DNA tesztikkel, hogy mikroorganizmus taxonokat különítsenek el a hordozó felületén (Wang et al, 2017).

## BIOFILM VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A hagyományos eleveniszapos rendszerek esetében általánosan elterjedtek a szerves/szervetlen anyagvizsgálatok, légzéstermek, illetve bonthatósági vizsgálatok. Ezeket kiegészítendő különböző mikroszkópos vizsgálatok is elterjedtek, melyek indikátor szervezetre épülnek, azok jelenléte, illetve hiánya sok mindent jelezhet egy iszap „jóságával” kapcsolatban. A biofilmes rendszerek esetében alkalmazhatóak az említett vizsgálatok, de nem adnak teljes képet a biológiai aktivitásról, ahhoz hozzátartozik a biofilm fejlettségének vizsgálata is, melynek egyik alapvető eleme a biofilm vastagsága.

A biofilm vastagságának vizsgálatához Hoang és munkatársai (2014) scanning elektron mikroszkópot (SEM) alkalmaztak, a mintákat előkezelés nélkül vizsgálták, majd szoftveresen (Atlas image processing) elemezték a mintáról készült képeket. A vizsgálatban K1-3 Anoxkaldnes hordozót alkalmaztak, mely a PE5 típushoz (3. táblázat) hasonló méret és formabeli paraméterekkel rendelkezik. A mikroszkópos felvételeken egyértelműen elkülöníthető a biofilm és a média, így könnyen számítható annak vastagsága.

Tanulmányukban a biofilm vastagság 95 percentilis értékei 110-225 µm között alakultak, illetve 40 µm vastagodást figyeltek meg a hőmérséklet emelkedésére (téli és nyári üzem közötti eltérés). Vizsgálatuk szerint a belső, védett területek gyakorlatilag betelepedtek, míg a külső részeken nem volt értékelhető vastagságú biofilm. Kiszámítottuk, hogy a hasonló méretű és fajlagos felületű hordozók esetében mekkora a védett felület aránya a teljeshez viszonyítottnak, melynek értéke 75,9% lett. Ez alapján a betelepülés mértéke az esetükben 75% körülire tehető.

Arabgol és munkatársai 2020. évi kutatásukban sztereómikroszkópot alkalmaztak a biofilm vizsgálatokhoz, majd Fiji szoftvert az elkészült képek elemzéséhez. Vizsgálatonként 3 hordozót vizsgáltak, azokon 64 helyen mértek biofilm vastagságot, majd átlagot vettek az egyes hordozókra. A vizsgálat során friss mintából dolgoztak, nem alkalmaztak kezelést a biofilmen. A kísérletek során Anoxkaldnes K5, Z200 és Z400 típusú hordozót alkalmaztak. Előbbinek 800 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> védett fajlagos felülete van, mely 83%-os betelepedettséget jelent, míg utóbbiak esetén hasonló méret, de kétszer akkora fajlagos felülettel jellemezhető egy hordozó. A hordozókon a biofilm vastagsága sorrendben 281, 112 és 174 µm volt. Utóbbi kettő esetében a védett terület szándékosan alacsonyabb, ezzel meggátolja a túlzott biofilm vastagság kialakulását.

Bjornberg és munkatársai 2009-ben Hydroxil-Pac hordozót alkalmaztak, melynek teljes fajlagos felülete 568 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, míg védett fajlagos felülete 388 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Sztereo mikroszkópot és ImageJ szoftvert alkalmaztak a biofilm vastagság megméréséhez. A vastagság 150-300 µm között alakult, mely erősen hőmérséklet függő volt.

Egy 2016-os átfogó, biofilm aktivitást kutató értekezésben megállapították, hogy 200 µm biofilm vastagság felett nem növekszik szignifikánsan az eltávolítási hatékonyság. E mellett a biofilm vastagodásával nő a biofilm mikroorganizmusainak diverzitása, köszönhetően a szimultán aerob és anaerob körülményeknek. Ugyanakkor, ha az aerob folyamatokat tekintjük, 20-30 µm az optimális biofilm vastagság (Torresi et al, 2016). Ezzel szemben Barwal és munkatársai (2014) szerint a biofilm vastagságának el kell érnie a 100 µm-es vastagságot, hogy a szubsztrátokat teljes mértékben fel tudja venni és megkötni a rögzült biomassza.

Rostmályva alapú hordozóanyagokkal végzett kísérletet Wei és munkatársai. A vizsgálataikban a hordozót különböző sűrűségű

szitákkal, mosogatás közben választották el és szedték részekre, majd SEM mikroszkóppal elemezték. Az elemzés szerint az átmérő 600-1400 µm között alakult a hordozók 60%-ában, maximálisan 2200 µm vastagsággal. Átmérő vizsgálatok mellett a biofilm vastagság vizsgálatokhoz zöld flourescens nukleinsav festéket (Thermo Fischer Scientific) alkalmaztak, hogy elkülönítsék a biofilmet a hordozótól. Vizsgálataik szerint a biofilm átlagosan 75 µm vastagságú volt a hordozón (Wei et al, 2021).

A rendelkezésre álló eredmények, termékek, illetve műszaki paraméterek alapján megállapítható, hogy a hagyományos hordozóanyagokra épülő technológiák esetében több változat, illetve számos gyártó termék közül válogathatunk, valamint az ezekre települő biofilm vizsgálatára pontos és részletes szakirodalom áll rendelkezésre. Ezzel szemben a mikroszkopikus méretű hordozók egy új tudományterületet képviselnek, több anyagtudományi vizsgálat zajlik az egyes hidrogélek tulajdonságainak fejlesztése, illetve feltérképezése érdekében, ebből fakadóan nem áll rendelkezésre olyan kiterjedt és részletes szakirodalmi tudásanyag, mint a hagyományos hordozók esetében.

## ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

A hidrogélek mérettartományának vizsgálatához nagy mennyiségű képet készítettünk (35-50 kép/minta) a hidrogélekről fénymikroszkóp (Zeiss AXIO Lab A1) és a hozzá tartozó szoftver (Zen 3.1, Blue Edition) segítségével. Ezt követően az Image Pro képfeldolgozó szoftver alkalmazásával elkülönítettük a teljes gél-felületet, illetve a biomasszával beborított területet. A vizsgálat, illetve a képfeldolgozás eredményeképpen nagy mennyiségű adat áll rendelkezésünkre a biofilm vastagságának növekedésére vonatkozóan, valamint, hogy a rendelkezésre álló felület hány százalékán van élő biomassza. Az élő biomasszát TTC festéssel (0,5% Trifenil Tetrazólium klorid) különítjük el a gélfelület többi részétől.

Egy mintavétel során az egyes hordozókról több tulajdonságot veszünk fel, melyek az adott hordozó átlag/minimum/maximum átmérője, a felülete, valamint a betelepedettség mértéke. A program számította minimum és maximum érték egy hordozó esetében az átmérő vonalak legnagyobb, illetve legkisebb értékét, míg az átlag az összes vonal átlagos hosszúságát jelenti. A hor-

dozó betelepedettségének mértékét százalékos értékben adjuk meg. Ennek eredete, hogy az alkalmazott szoftver kiszámolja a hordozó teljes felületét, majd leválogatjuk szín alapján (TTC festés) a betelepült részeket, így megkapjuk a nem betelepedett területek méretét. A következő képlettel történik a számítás:

$$B = \frac{A_{\text{egész}} - A_{\text{üres}}}{A_{\text{egész}}} * 100$$

Ahol:

**B** – Betelepülés mértéke [%],

**A<sub>egész</sub>** – Teljes hidrogél felület [pixel]

**A<sub>üres</sub>** – üresen maradt, nem betelepült részek [pixel]

Mivel az eredmények %-os értékben értendők, nem szükséges a program alapvető számítási egységét, a pixelt átállítani. Amikor átmérőt szeretnénk vizsgálni a program segítségével, szükséges egy kalibráló fénykép készítése, melynek segítségével meg tudjuk adni, hogy egy pixel hány mikrométer. Az így kapott váltószámmal szükséges átváltani a programból kapott átmérő pixel eredményeket mikrométer mértékegységre.

Egy mérés során kaptunk 40-75 átlag/minimum/maximum értéket, mely azt jelenti, hogy az egyes hidrogél két pontja közötti legkisebb távolság (minimum), legnagyobb távolság (maximum) és átlagos átmérőt jelöli. Az adatok áttekinthetőbb vizsgálata érdekében egy vizsgálat mintáit érdemes összevonni, így vettük az egyes komponensek (min/max/átlag) átlagát, amiből a további számításainkat képeztük. Az elemzések elkészítéséhez Excelt, és Past statisztikai értékelő szoftvert alkalmaztunk.

A biofilmes vizsgálatok mellett meghatározásra került a hidrogélek fajlagos felülete. A vizsgálat során meghatároztuk, hogy adott hidrogél térfogat mellett (30 perces ülepedés után) összesen hány darab hidrogél található. Ez alapján már kiszámítható a hidrogél mennyiség térfogategységre vetítve. Ezt követően a kontroll mikroszkópos vizsgálatokból kapott hidrogél átmérőből kiszámoltuk egy hordozó felületét. A kettőből már számítható a fajlagos felület a következő képlet segítségével:

$$\frac{C_{gel}}{V_{gel}} * 10^6 * \frac{4r^2\pi}{10^{12}}$$

Ahol:

$C_{gel}$  – hidrogél darabszáma, [-]

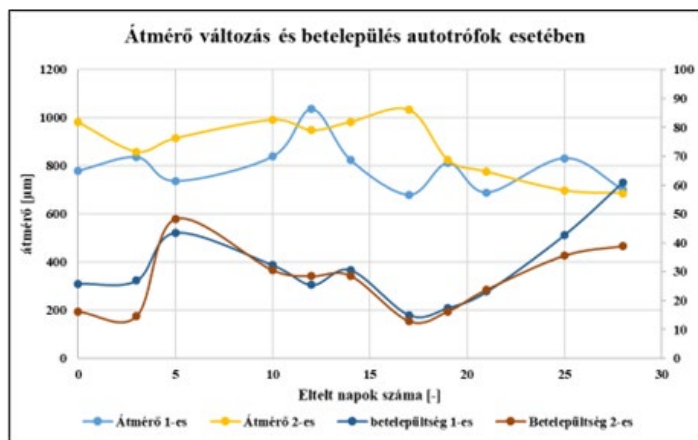
$V_{gel}$  – hidrogél térfogata 30 perc ülepedést követően [ml]

$r_{gel}$  – hidrogél átlagos sugara [ $\mu$ m]

A vizsgálatok egy részét laboratóriumi körülmények között végeztük el. Ebben az esetben speciális üveg reaktorokat alkalmaztunk, mesterséges szennyvizet készítettünk, és meghatározott ciklusidővel SBR (sequence batch reactor) üzemmódban működtettük a különböző hidrogéllal feltöltött reaktorokat. Autotróf kultúrát vizsgáltunk. Üzemi körülmények között egy konténerizált technológiát töltöttünk fel hidrogélekkel, mely biológiai reaktorok mérete egyenként 6,92 m<sup>3</sup>. A konténer folyamatos átfolyású, naponta 28 m<sup>3</sup> kommunális szennyvíz megtisztítására képes.

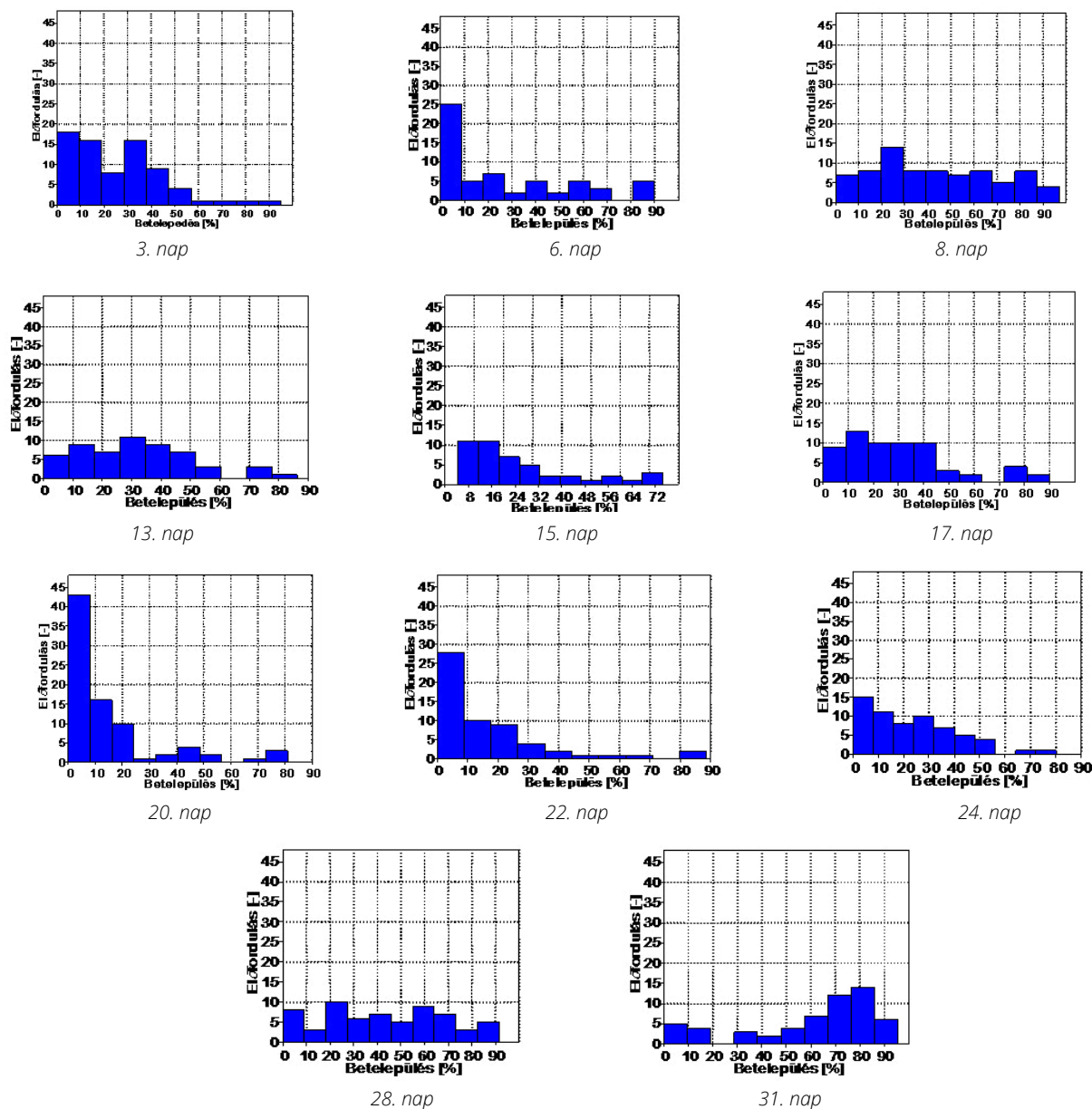
## BIOFILM SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A laboratóriumi vizsgálatok során autotróf organizmus kultúrák betelepedését vizsgáltuk „alap”, illetve aktívszén adszorbenssel szintetizált hidrogélek esetében (1-es és 2-es reaktor). Ebben az esetben az összes mért átmérőnek vettük az átlag értékét, az eredmények a 4. ábrán láthatóak.

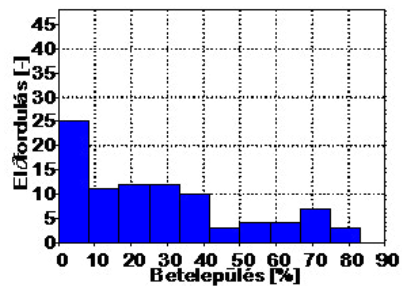


4. ábra: Autotróf kultúrák betelepedése és átmérő változása

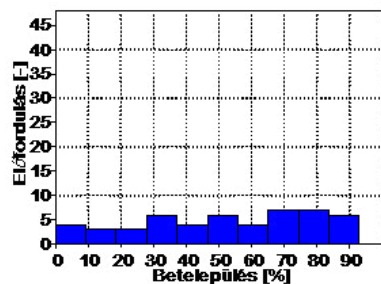
Az ábrán látható, hogy a betelepedés mértéke ingadozott, kis mértékben növekedett a vizsgálat alatt, míg az átmérő nem növekedett szignifikánsan annak ellenére, hogy biofilm a betelepedettségi érték alapján növekedést mutat annak felületén. Ezért megvizsgáltuk azt, hogy milyen eloszlást mutat a betelepedettség aránya az egyes mintavételi időpillanatokban (5. ábra).



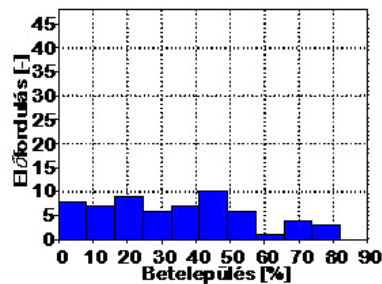
5. ábra: Betelepülés eloszlásának változása az alap hidrogél esetében



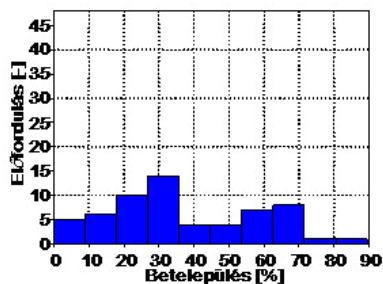
3. nap



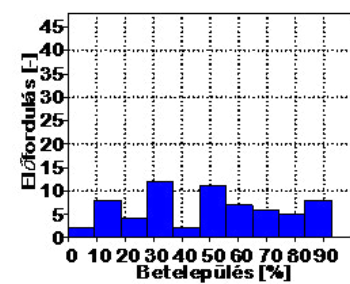
9. nap



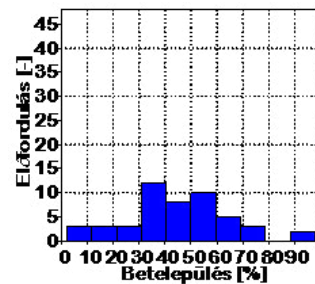
13. nap



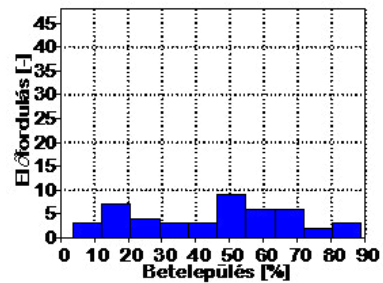
16. nap



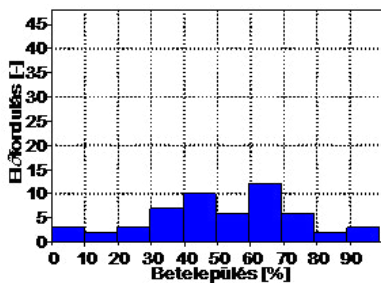
19. nap



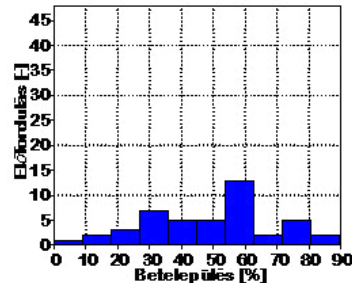
26. nap



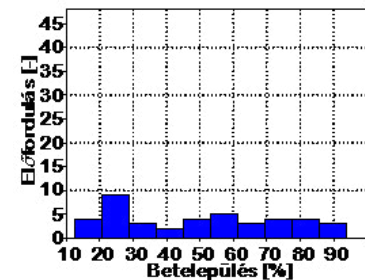
32. nap



34. nap



37. nap



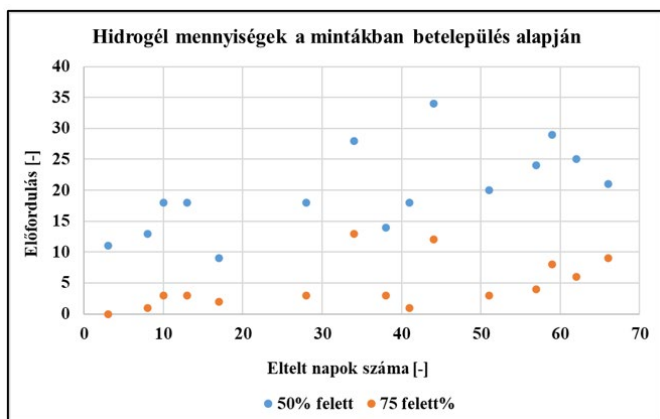
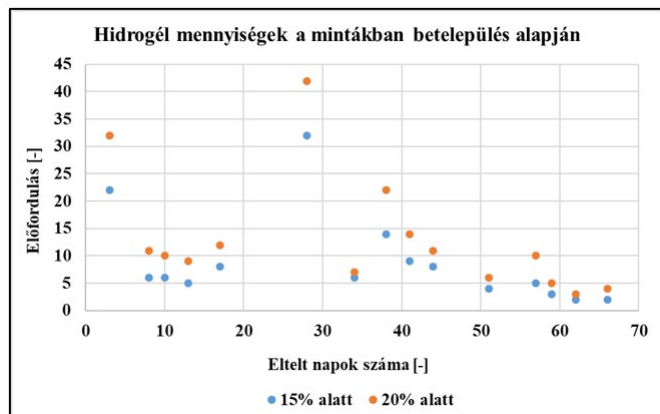
41. nap

6. ábra: Betelepülés eloszlásának változása konténerizált körülmények között (vastartalmú hidrogél)

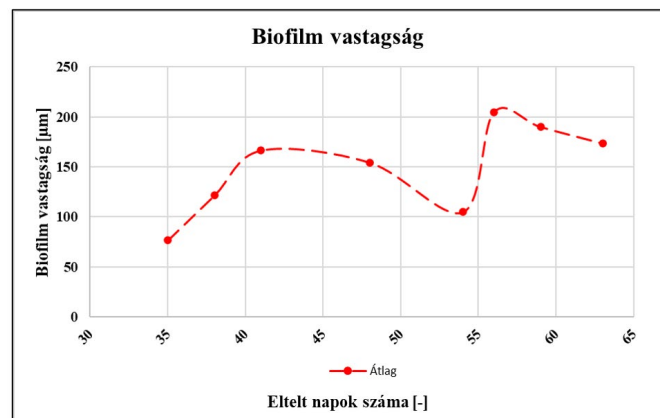
Az 5-6. ábrán látható az egyes hidrogélek számított felületének betelepülése %-os értékben a kísérlet indításától eltelt napok függvényében mind laboratóriumi, mind pedig ipari (konténerizált) léptékben. Jól látható, hogy nagy mértékű ingadozást, illetve széles eloszlást mutat már a kísérlet legelején, illetve a vége felé egyaránt. A 6. ábrán látható, hogyan változik a hidrogélek betelepedettségének mértéke ipari körülmények között, vastartalmú hidrogélek esetében. A betelepedés mértéke gyorsabb, valamint jobb kihasználásra kerül a rendelkezésre álló felület. Ennek oka elsősorban a konténerizált technológiára vezetett szennyvíz összetételéből adódó vegyes kultúra szemben az autotróffal, ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy hasonlóak a trendek, tehát már a kísérletek elején vannak hidrogélek magas betelepedettséggel (>50%), illetve jelentős idő elteltével is vannak olyan hordozók, melyeknek a betelepedettsége 10% körül található. Mindkét szituációban több hidrogél esetében előfordul 90% körüli betelepedettség, ám ennek előfordulása alacsony, átlagosan 50-60% között ingadozik ez az érték, mely kis mértékben alulmarad a szakirodalmi adatokhoz képest.

A következő lépésben, hogy a tényleges biofilmet, illetve annak vastagságát tudjuk vizsgálni, meg kell határozni azt az értéket, mely fölött ténylegesen kimutatható a biofilm vastagodás az átmérő változáson keresztül. Ezen értékek mellé kell rendelni egy kontroll átmérőt, mely jellemzi a hidrogél biofilm nélküli átmérőjét, így a kettő különbsége kiadja a biofilm vastagságának kétszeresét. Ezen számításokhoz ugyanabban a reaktortérben lévő hidrogélek átmérőit alkalmaztuk, azzal a kikötéssel, hogy a rendelkezésre álló felület hány %-át foglalták el mikroorganizmusok. Ahhoz, hogy egy-egy betelepedettségi %-os határértéket megvizsgáljunk, megnéztük, hogy hány minta tartozik az adott %-os egységhez.

A 7. ábrán látható, hogy 20% alatti betelepültséggel az esetek jelentős részében több hidrogél található, így statisztikailag ezen tartomány értékelése célravezetőbb. E mellett látható a betelepülés folyamata, egyre kisebb mennyiségben vannak jelen olyan hidrogélek, melyek betelepedettsége ebben az alacsony tartományban mozog. A jobb oldali ábrán megfigyelhető, hogy 75% feletti betelepültség kevés hordozón alakult ki, ezzel szemben 50% feletti betelepültségű hordozók nagy (és a vizsgálat alatt növekvő) mennyiségben találhatók. Ezek alapján számítható biofilm vastagság, melynek eredményeit a 8. ábrán ismertetünk.



7. ábra: Hidrogél mennyisége a betelepültség függvényében

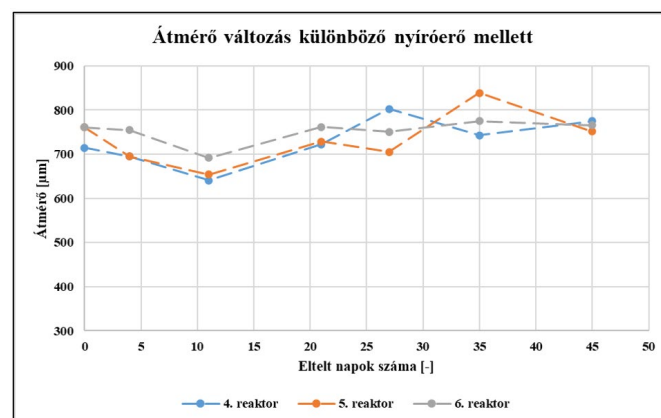


8. ábra: A számított biofilm vastagság

A 8. ábrán látható a számított biofilm vastagság az eltelt napok függvényében. A számítás során kivontuk az >50% betelepültségű hidrogélek átlag átmérőjéből a <20% betelepültségű hidrogélek átmérőjének átlagát. A számítások szerint a biofilm vastagsága 77-204 μm között változik, mely a szakirodalmi adatok felső, illetve alsó szélső értéke között mozog. Az adatokban jelentős ingadozás figyelhető meg, mindemellett a tendencia növekvő.

A betelepültség mértéke alapján történő biofilm vastagság számítása „jó” adatokat ad, ugyanakkor nagy az ingadozás az értékek között, akár pár nap leforgása alatt, valamint az egyes adatok megbízhatósága is eltér, hiszen vannak mérési napok, ahol 20-30 hidrogél által alkotott átlaggal lehet számolni, viszont (elsősorban az alacsony betelepültség mellett) vannak esetek, ahol ez a szám csupán 4-5, valamint az alacsony betelepültség ellenére elképzelhető, hogy noha kis mértékben is, de a biológiai aktivitás befolyásolhatta ezen hidrogélek átmérőjét.

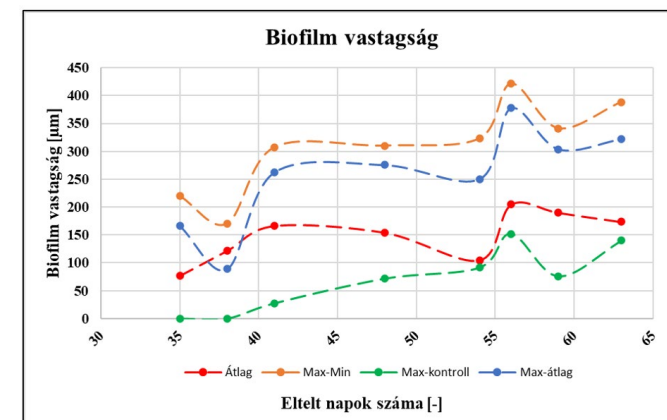
A fenti bizonytalanságok miatt laboratóriumi körülmények között is végeztünk kísérletet a konténerizált technológiában alkalmazott hordozókkal. A kísérletek során az egyes hidrogélek (hordozók) átmérőjének alakulásának követése volt a cél. Három reaktort indítottunk el különböző keverési intenzitással, biológiai aktivitás nélkül, majd nyomon követtük az átmérők változását. A kísérletek során választ kaptunk arra, hogy az egyes nyíróerők milyen (ha egyáltalán) hatással vannak a hordozóra, illetve történik-e szignifikáns átmérő változás. A 6-os reaktor esetében 330RPM (round per minute)-es, az 5-ösnél 220RPM, míg a 4-es reaktor esetében 150RPM keverési értéket állítottunk be.



9. ábra: Nyíróerő tesztés kontroll kísérletek

A 9. ábrán mutatjuk be a későbbiekben kontrollnak alkalmazott (biofilmes aktivitás nélküli) kísérleteket. Az ábráról két dolog olvasható le: hogy nincs különbség a különböző nyíróerő mellett végzett kísérletek között, illetve, hogy a hidrogélek átmérője nem változik, amennyiben a biológiai aktivitás nem szignifikáns a reaktorban.

Következő lépésként a kísérletből kapott kontroll értékeket vettük alapul a biofilm vastagság számítás esetében. Amennyiben a kontroll alkalmazása esetében továbbra is az 50% feletti betelepültségű hidrogélek átlag átmérőjével dolgozunk, az értékek több esetben negatív, illetve 0 közeli értékeket vesznek fel. Ennek egyik oka lehet, hogy a biológiai aktivitás csekély hatására is csökken a hordozó átmérője. Másik lehetőség, hogy a biofilm vastagsága igen alacsony, így statisztikailag nehezen kimutatható az adott számokkal. Ebből a feltételezésből kiindulva az egyes hordozók maximális átmérőjével is elvégeztük a számításokat, azon alapulva, hogy ahol a legnagyobb az átmérő, várhatóan azokra a területekre telepedett a hidrogélen található biofilm.

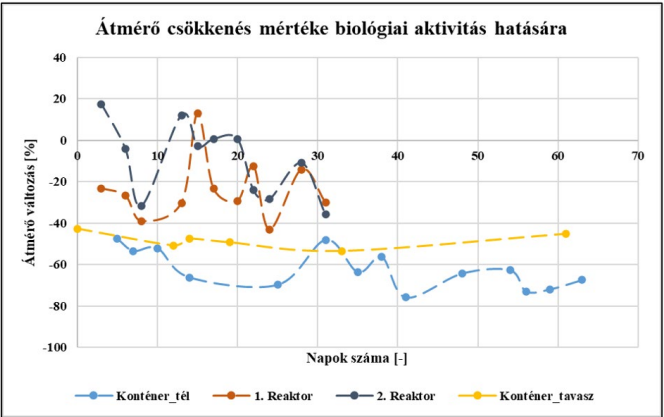


10. ábra: Biofilm vastagságok eltérő számítások alapján

Ezen a gondolatmeneten elindulva kiszámítottuk a >50% feletti betelepültségű hordozók maximum és a <20% betelepültségű hordozók minimum, illetve átlag átmérőjéből képezett biofilm vastagságot. Mellé tettük az eddigi számítás eredményeit (átlag) illetve a >50% maximum értékekből kivontuk a kontroll mintánkat (10. ábra). Látható, hogy az eddigiekhez képest a maximum értékek bevonása növekedést eredményezett, míg a kontroll (maximum-kontroll) bevonása csökkenést. Meg kell jegyezni

azonban, hogy a legkonzisztensebb biofilm növekedést a kontroll bevonásával értük el.

A kontroll alkalmazása átlagos biofilm vastagságok esetében sok negatív eredményt adott, ezért szükségesnek éreztük megvizsgálni az alacsony betelepedettségű hidrogélek és a kontroll eredményyor kapcsolatát. Ebben az esetben megvizsgáltunk kétféle hidrogélt laboratóriumi körülmények között, illetve a konténerizált technológiában alkalmazott hidrogéleket.

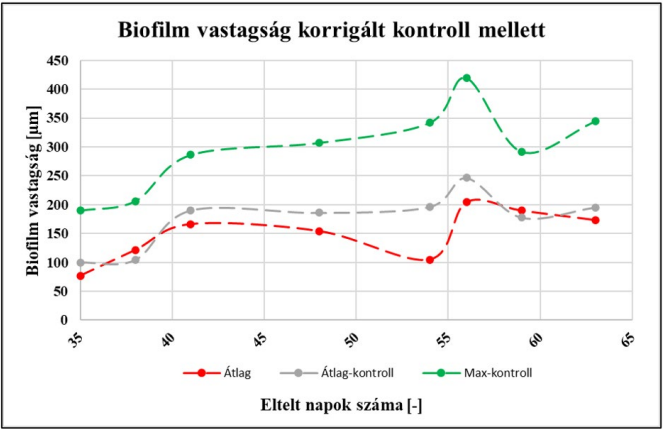


11. ábra: Átmérő csökkenés a hidrogélek esetében különböző körülmények között

A 11. ábrán látható esetekben a <20% betelepülésű, minimum értékekből vontuk ki az adott naphoz tartozó kontroll átmérőt. A számítás során így kiszűrtük azokat a hidrogéleket, amelyen jelentős biomassa található, így a tényleges hordozó méreteket vehettük alapul. A minimum értékekkel történő számolás azt a célt szolgálta, hogy kiszűrjük az esetleg kinyúló, fonalas részeket. Jól látható, hogy laboratóriumban az autotróf kultúra mellett is csökken a hidrogélek átmérője, de nem akkora mértékben, mint konténerizált körülmények között, ahol túlnyomórészt heterotróf kultúráról beszélhetünk. A jelenség magyarázata a hidrogélben található keményítő organizmusok által történő fogyása lehet. A csökkenés mértéke idővel lassul, majd elkezdi egy érték körül ingadozni, feltehetően ekkorra fogy el a keményítő, és a hidrogél nem bontható része marad.

Az így kapott eredmények alapján szükségszerű korrigálni a

konténerizált technológiában alkalmazott kontroll átmérőket, ha valós adatokat szeretnénk kapni a biofilm növekedését illetően. Ennek érdekében a kiszámolt csökkenés mértékével kiigazítottuk az egyes napokhoz tartozó kontroll értékeit, majd ezzel néztük meg az egyes eseteket, hogy melyik statisztikai paraméter milyen biofilm vastagság értékeket jelent.



12. ábra: Korrigált kontrollok mellett alakuló biofilm vastagság

A 12. ábrán látható az eredeti, >50% betelepülésű átlagos átmérőből a <20% betelepedésű átlagos átmérő kivonásából adódó érték (átlag) változása a vizsgálat alatt. E mellett megvizsgáltuk, hogy mekkora biofilm vastagság értékeket kapunk, ha a korrigált kontrollt kivonjuk a hidrogélek maximális és átlagos átmérőjéből. Utóbbi görbéken látható, hogy a maximum alkalmazása jelentősen nagyobb biofilm vastagságot eredményezett, mint a szakirodalmi adatok alapján lehetséges értékek, illetve az átlag alkalmazása (átlag-kontroll) egy hasonló trendet eredményezett, mint az eredeti számítási módszertanunk, ugyanakkor csökkentette annak bizonytalanságát és ingadozását.

A szakirodalmi adatokat, valamint a hidrogél átlagos átmérőjét figyelembe véve kijelenthető, hogy a korrigált kontrollal számolt, >50% betelepedettségű hidrogél hordozók átmérőinek átlagából képzett értékek adják jelenleg a legpontosabb számot a biofilm vastagságát illetően.

## FAJLAGOS FELÜLET MEGHATÁROZÁSÁNAK BEMUTATÁSA

Összesen 5 különböző térfogatban mértünk ki hidrogéleket az elemzés végrehajtásához. Az egyes térfogategységek, valamint a hozzájuk tartozó számlálási eredmények a **2. táblázatban** láthatóak.

| Darab/ml | Térfogat [ml] | db/m <sup>3</sup> |
|----------|---------------|-------------------|
| 16,11    | 250           | 24,41             |
| 16,06    | 250           | 24,36             |
| 16,01    | 250           | 24,30             |
| 15,45    | 200           | 23,96             |
| 15,59    | 200           | 24,11             |
| 15,58    | 200           | 24,10             |
| 15,30    | 150           | 24,10             |
| 15,27    | 150           | 24,08             |
| 15,33    | 150           | 24,13             |
| 15,21    | 100           | 24,42             |
| 15,26    | 100           | 24,48             |
| 14,62    | 50            | 24,52             |
| 14,68    | 50            | 24,58             |
| 14,64    | 50            | 24,54             |

2. táblázat: darab/m<sup>3</sup> és a hozzá szükséges értékek

A könnyebb átláthatóság érdekében a darabszámok természetes alapú logaritmusát alkalmaztuk (2. táblázat). Látható, hogy konzisztensen hozták az ismétlések ugyanazt a tartományt. Ezekhez az értékekhez hozzá kell társítani a hidrogélek mikroszkópos vizsgálataiból nyert átmérő értékeket, hogy kiszámíthassuk a fajlagos felületet. A fajlagos felület kiszámításához a laboratóriumban alkalmazott hidrogélek kontroll vizsgálatának átlagát használtuk fel. A számítások alapján a hidrogélek fajlagos felülete 63287 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során a szakirodalmi információk alapján áttekintettük a biofilmes szennyvíztisztítás fejlődésének folyamatát, illetve elemeztük az egyes lépcsőfokokat annak függvényében, hogy a

technológia legfontosabb technológiai paraméterei hogyan alakulnak. Láthattuk, hogy a hagyományos mozgóágyas biofilmes rendszereknek kiterjedt a szakirodalma, különböző technológiai specifikációk léteznek, akár brossúrákon, akár cikkeken keresztül ezek publikus adatbázisokban elérhetőek. E mellett azonban bemutattuk a biofilmes szennyvíztisztítás fiatalabb, következő generációját, a mikroszkópikus méretű hordozóanyaggal felszerelt tisztítási eljárásokat. Ez az iparág jelenleg nem rendelkezik olyan részletes és egységes irodalmi háttérrel, mint hagyományos társai, éppen ezért minden kutatás fontos és értékes az új területek megismerése szempontjából. Ebbe a kategóriába sorolható a speciális mikrohordozót alkalmazó MICROBI technológia, melyben a hordozók mérete 293 µm és 1362 µm közé tehető. Mind a szakirodalmi kutatáson, mind pedig saját vizsgálataink alapján megállapítható, hogy ezek az új hordozók speciális kihívásokat rejtenek; új mérési módszerek, valamint vizsgálati szempontok szükségesek ahhoz, hogy ezen a téren is kiterjedt tudáshalmaz legyen elérhető. Jelen technológia esetében az elvégzett kísérletek, illetve számítások alapján fontos előrelépéseket tettünk a biofilm vastagság meghatározás terén. Meghatároztuk a biofilmes aktivitás, illetve a keverés hatását a hordozóra. Ezen vizsgálatok alapján pontosítani tudtuk az eddigi biofilm számítási módszerünket, melynek segítségével pontosan meghatározható a mindenkor biofilm vastagság a hordozón. Következő lépésként meghatároztuk a hidrogél hordozó fajlagos felületét, hogy összevethessük a szakirodalomban leírt paraméterekkel. Megállapítható, hogy a mikroszkópikus PVA alapú hidrogéljeink fajlagos felülete tekintetében a hagyományos hordozókéknál nagyságrenddel nagyobb, míg a betelepedési ráta enyhén alacsonyabb, a biofilm vastagsága viszont megegyezik a szakirodalomban optimálisnak nevezett értékekkel (100-200 µm).

## FELHASZNÁLT IRODALOM

1. IWA Task Group on Good Modelling Practice - Leiv Rieger, Sylvie Gillot, Guenter Langergraber, Takayuki Ohtsuki, Andy Shaw, Imre Takacs, Stefan Winkler (2012) *Guidelines for Using Activated Sludge Models*, IWA Publishing.
2. Vladimir Hlady and Jos Buijs (1996) Protein adsorption on solid surfaces, *Current Opinion in Biotechnology*, 10.1016/s0958-1669(96)80098-x
3. Kaplan, J.B., C. Ragunath, N. Ramasubbu and D.H. Fine, 2003. Detachment of *Actinobacillus actinomycetemcomitans* biofilm cells by an endogenous beta-hexosaminidase activity. *J. Bacteriol.*, 185: 4693-4698
4. <https://wapp.hu/technologiak/mozgoagyas-biofilmes-szennyviztisztitasi-technologiak-mbbr/>
5. Dong-chul Shin, Ji-suk Kim, Chul-hwi Park (2019) Study on physical and chemical characteristics of microorganism immobilized media for advanced wastewater treatment, *Journal of Water Process Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100784>
6. Hassan, C.M.; Peppas, N.A. Structure and applications of poly(vinyl alcohol) hydrogels produced by conventional crosslinking or by freezing/thawing methods. *Adv. Polym. Sci.* 2000, 153, 37-65.
7. Nan Hou, Ran Wang, Fan Wang, Jiahui Bai, Jingxin Zhou, \* Lexin Zhang, Jie Hu, Shufeng Liu, and Tifeng Jiao (2020) Fabrication of Hydrogels via Host-Guest Polymers as Highly Efficient Organic Dye Adsorbents for Wastewater Treatment, *ACS Omega* 2020 5 (10), 5470-5479 DOI: 10.1021/acsomega.0c00076
8. Kuo-Cheng Chen, Shih-Chang Lee, Sheng-Chi Chin, and Jer-Yiing Hwang (1998) Simultaneous carbon-nitrogen removal in wastewater using phosphorylated PVA-immobilized microorganisms, *Enzyme and Microbial Technology* 23:311-320
9. Hoang, V. -Delatolla, R. - Abujamel, T. - Mottawea, W. - Gadbois, A. - Laflamme, E. - Stintzi, A.: Nitrifying moving bed biofilm reactor (MBBR) biofilm and biomass response to long term exposure to 1 °C. *Water Research* 49 (2014) 215-224. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.0>
10. Arabgol, R. - Vanrolleghem, P. A. - Delatolla, R.: Influence of MBBR carrier geometrical properties and biofilm thickness restraint on biofilm properties, effluent particle size distribution, settling velocity distribution, and settling behaviour. *Journal of Environmental Sciences* 122 (2022) 138-149.
11. Bjornberg, C. - Dr. Lin, W. - Dr. Zimmerman, R.: Effect of Temperature on Biofilm Growth Dynamics and Nitrification Kinetics in a Full-Scale MBBR System. *Water Environmental Federation* 2009, 4407- 4426.
12. Torresi, E. - S. Fowler, J. - Polesel, F. - Bester, K. - R. Andersen, H. - F. Smets, B. - Gy Plosz, B. - Christensson, M.: Biofilm thickness influences biodiversity in nitrifying MBBRs – Implications on micropollutant removal. *Environmental Sciences & Technology* 2016, 1-30. DOI: 10.1021/acs.est.6b02007
13. Barwal, A. - Chaudhary, R.: To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 13/3 (2014) 285-299. DOI 10.1007/s11157-014-9333-7
14. Riham Surkatti, Mark C. M. van Loosdrecht, Ibtelwaleed A. Hussein and Muftah H. El-Naas (2024) PVA-TiO2 Nanocomposite Hydrogel as Immobilization Carrier for Gas-to-Liquid Wastewater Treatment, <https://doi.org/10.3390/nano14030249>
15. Yibo Wang, Yonghong Liu, Minquan Feng and Lina Wang (2017) Study of the treatment of domestic sewage using PVA gel beads as a biomass carrier, doi: 10.2166/wrd.2017.181
16. Stephany P. Wei, Bao Nguyen Quoc, Madelyn Shapiro, Pin Hsuan Chang, Jason Calhoun, Mari K.H. Winkler (2021) Application of aerobic kenaf granules for biological nutrient removal in a full-scale continuous flow activated sludge system, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129522>
17. Förstner, U. (1993) *Környezetvédelmi technika, Szennyvíz*, Springer Hungarica, pp. 155-156.
18. Vladimir Hlady és Jos Buijs (1996) Protein adsorption on solid surfaces, *Analytical Biotechnology*
19. Husham Ibrahim (2012) Review on Moving Bed Biofilm Processes, DOI: 10.3923/pjn.2012.804.811
20. Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4th Edition, McGraw-Hill, New York
21. Vibeke Ramussen, Kaldnes Miljøteknologi AS (2011) *The Kaldnes Moving Bed biofilm process – an innovative solution to biological waste water treatment*, Postboks 2011, N-3103 Norway
22. <https://www.bio-fil.es/facilities/moving-bed/design-considerations-mbbr/>
23. <https://www.hel-x.eu/en/home-christian-stoehr-gmbh-co/>
24. <https://www.mutag.com>
25. <https://nexom.com/bioports-mbbr/>
26. <https://www.ssiaeration.com/ssi-mbbr-landing-page/>
27. <https://www.ztsmallboss.com/product/category/mbbr-bio-media>

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00118 számú projekt eredményire épül. A projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2019-1.1.1-PIACI KFI pályázati program (PIACVEZÉRELT KUTATÁS-FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS PROJEKTEK) finanszírozásában valósult meg.

Készült a Kooperatív Doktori Program (KDP) keretein belül, a Kulturális és Innovációs Minisztérium, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatásával.