

Egy dolog feltehetően akkor egyszerű, ha többféleképpen is pontosan le tudjuk írni anélkül, hogy azonnal egyértelművé válna: ugyanarról a dologról van szó.

R. Feynman

A SZENNYVÍZTISZTÍTÁS HATÉKONYSÁGÁNAK JAVÍTÁSA MÓDOSÍTOTT BIOLÓGIAI SZŰRÉSEL

TOLNAI BÉLA

BioModel Bt.

tolnaibela51@gmail.com

Kulcsszavak: biológiai víztisztítás, szennyvíztisztítás, Pe-szám, kavitron alkalmazása

TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A biológiai víztisztítás a szennyező molekulák lebontását végzi, amely enzimek által katalizáltan történik. A folyamat két egymást követő részfolyamatra bontható. Az elválasztás a biofilmen kívüli és a biofilmen belüli jelenségek alapján történik. A biofilmen kívül az anyagtranszport a meghatározó. A biofilmen belül a biokémia törvényei a dominálnak.

A lebontás feltételeinek javítása a jelenséget leíró összefüggések paramétereinek befolyásolása révén lehetséges. Elsősorban a biofilmek tápanyagellátását szabályozhatjuk. A tápanyagellátás mennyiségi állapotát a Pe-szám (Peclet) jellemzi, amelynek optimális értéke: $Pe=1$. A partiszűrésnél $Pe = 10$ a jellemző érték, mesterséges körülmények közt megvalósított biológiai szűrések esetében ennél nagyságrendekkel nagyobb számok érhetők el. Az eleveniszapos szennyvíztisztítás a nagy Pe-számmal jellemezhető folyamatok közé tartozik. A szennyvíztisztítás hatékonyságjavításakor a műveletek célja a Pe-szám csökkentése.

A biofilmen belüli történések befolyásolására egyelőre kevés a lehetőség.

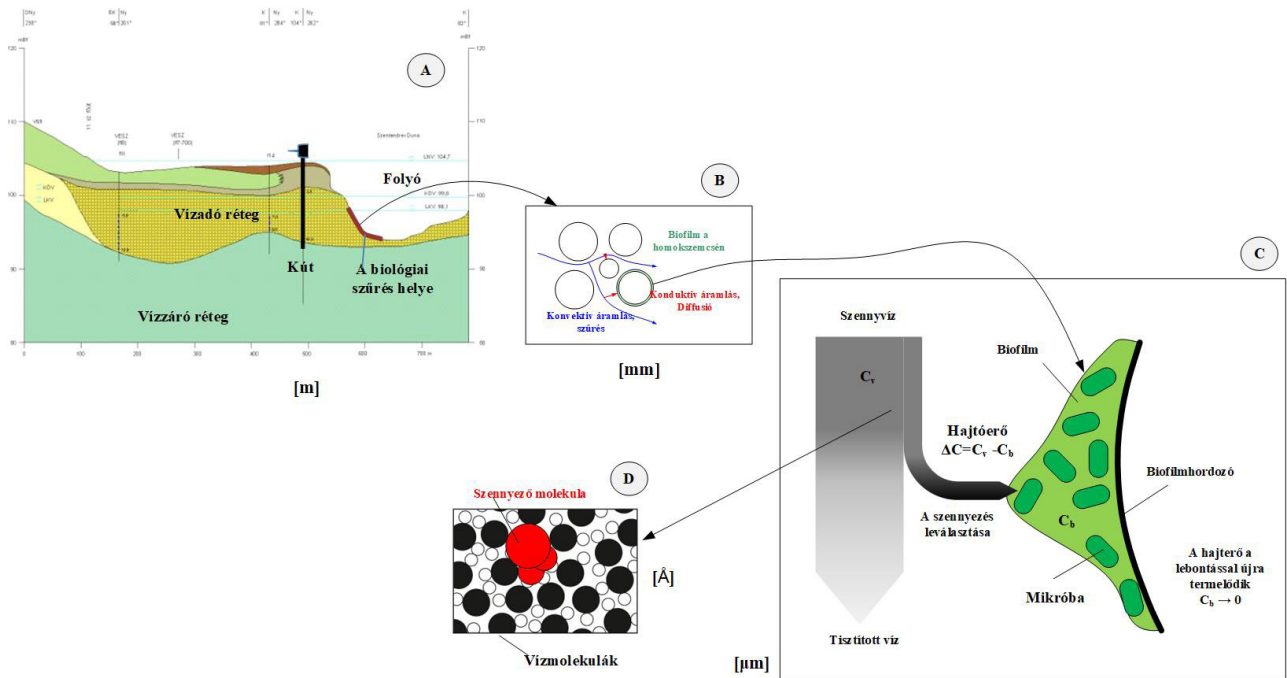
1. BEVEZETÉS

A biológiai szűrés folyamata leginkább a partiszűrés jelenségén figyelhető meg. A vízfolyások partszakaszán kutat a szűrőréteg megcsapolása érdekében építünk. A kútban a szivattyúzás a vízadó rétegben vízmozgást hoz létre (lásd 1. A ábra). A vízsebesség a part menti a rétegben a lekisebb ($0,1 \text{ m/d}$), a kútig a sebesség cca 10000-szeresre nő. A biológiai szűrés a folyó és a vízadóréteg találkozásától indul el. Az itt kialakuló biológiailag aktív vízadóréteg vastagsága csupán néhány méter (Jekel, Grünheid. 2005).

Az áramvonal elején a homokszemcsék felületén biofilm alakul ki. A homokszemcsék között szivárgó víz folyamatosan szállítja a tápanyagot a biofilmhez (konvektív anyagáramlás). A tápanyag a biofilmbe diffúzió útján jut (konduktív anyagáramlás) (lásd 1. B ábra).

Az 1 D. ábra millárdszoros nagyításban a vízmolekulákat és a közéjük került szennyezést mutatja. A víz azáltal tisztul, ha ezt a szennyezőmolekulát a vízmolekulák közül ki tudjuk mozgatni.

A szennyező molekula leválasztását az 1 C ábrán követhetjük nyomon. A vízteret



1. ábra Partiszűrés nagytartókban: mennyiség és minőség szivattyúzással

sematikusán a nyilak szimbolizálják. A szennyező molekula átlépése a biofilmbé azért történik, mert a víztérben a szennyezés koncentrációja nagyobb, mint a biofilmben. A koncentráció különbség diffúziós mozgást hoz létre.

Ha a biofilmen belül nem történne lebomlás a koncentráció különbség előbb-utóbb kiegyenlítődne. A biofilmen belül azonban a baktériumok közreműködésével a szennyező molekula elbomlik, miáltal a koncentráció lenullázódik, újrateermelve a koncentráció különbséget.

Összefoglalóan a biológiai a víztisztulás teljes folyamatát az 2. ábrán láthatjuk. Megadva az egyes részfolyamatok hajtóerejét és a fenntartás módját.

Ezt a rendkívül bonyolult fizikai és biokémia folyamatot modellel írhatjuk le. (Tolnai 2013, 2017). A modellt matematikailag egy képlet reprezentálja, amely a tápanyaglebontás

mértékét adja meg. A dimenzióanalízis segítségével (Szirtes, 2007), heurisztikus úton levezetett összefüggésben szereplő változók dimenziótlan változók.

$$\Delta S : S \frac{1}{Pe} Ne^{1/3} \tag{1}$$

ahol:

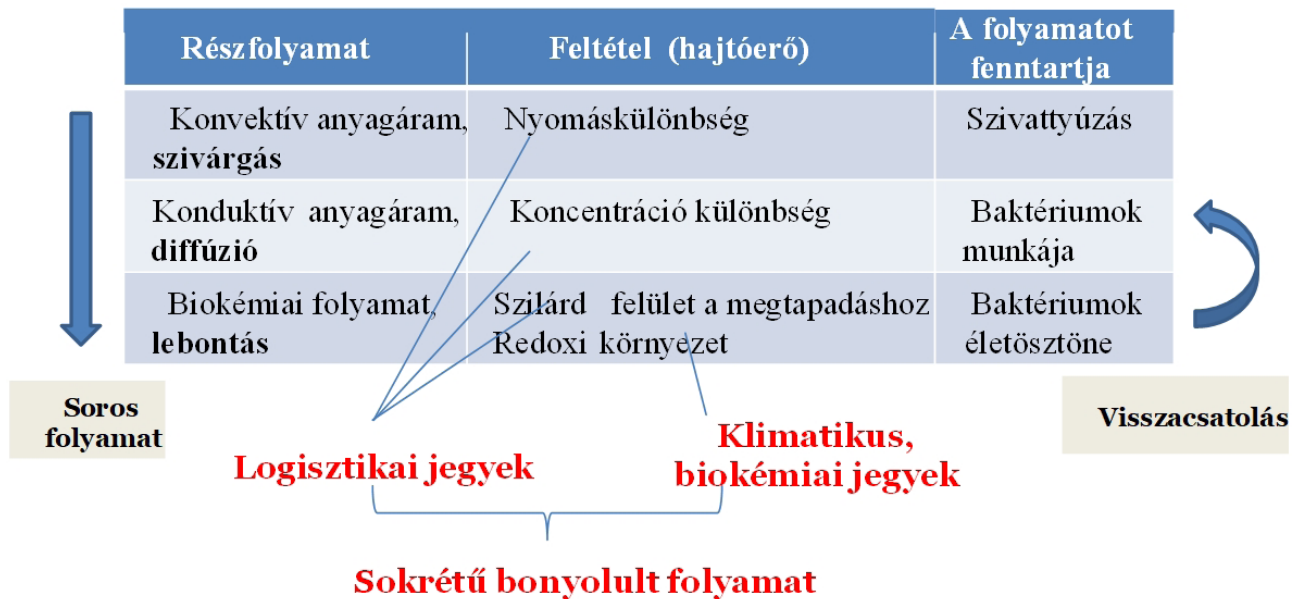
ΔS szubsztráttartalom fogyása
 S szubsztráttartalom

$$Pe = \frac{w d_e}{D_s}$$

Pe Pelet szám
 w konvektív sebesség
 d_e biofilmhordozó közeg egyenértékű szemcseátmérője
 D_s szubsztrát diffúziós tényező

$$Ne = rH_2 - 2 pH$$

Ne Nernst tényező
 Az elmélet szerint a biofilmen kívüli anyagadási és a biofilmen belüli molekula lebontási folyamat egységet képeznek ugyan,



2. ábra A biológiai szűrés részfolyamatai

de a részfolyamatok elválasztása, egymástól független értelmezése célszerű és a jelenség könnyebb megértéséhez vezet. Az anyagátadás hasonlósági kritériuma a Pe-szám (Peclet), míg a biofilmen belüli lebontási jelenség hasonlósága a Ne-tényező (Nernst) segítségével írható le.

Magyarázatot igényel a de, egyenértékű szemcseátmérő fogalma. A de egyenértékű szemcseátmérő annak a csak külső felszínnel bíró, gömb alakú szemcsének az átmérője, amely szemcsével megtöltve a V reaktorteret ugyanakkora felülettel rendelkezik, mint ugyanezt a teret kitöltő biofilmhordozó anyagok F felülete. A de kiszámítására alkalmas képlet könnyen belátható.

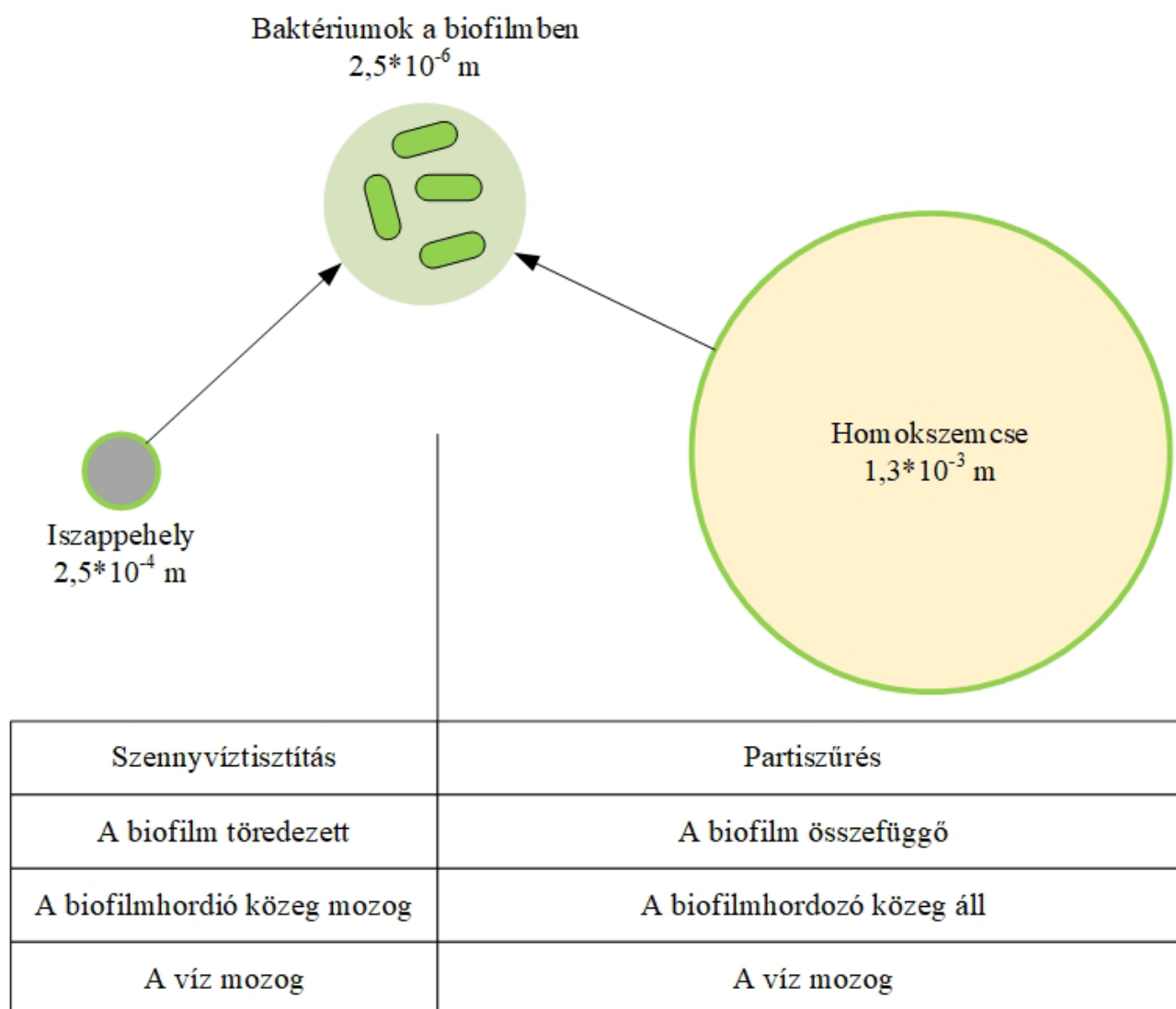
$$d_e = 6 \frac{V}{F} \quad (2)$$

A de egyenértékű szemcseátmérő a nagy fajlagos felületű anyagok esetében nem egy valós szemcseméret, hanem egy elméleti érték, amely a felület nagyságát lineáris skálán méri.

Minél kisebb de számértéke, annál nagyobb a baktériumok letelepedéséhez rendelkezésre álló felület. A de egyenértékű szemcseátmérő közös nevezője a legkülönféle biofilmhordozó felületeknek.

A w konvektív sebesség meghatározása partiszűrés esetében egyszerű, mert a biofilmhordozó közeg, a homok áll, hozzá képest a víz mozog. A szivárgó víz sebessége könnyen számítható, mérhető. Értéke nagyon alacsony, 0,1 [m/d]. Ha a partiszűrés működésmódját a szennyvíztisztítás irányába általánosítjuk, úgy a változók többségének értelmezése azonos, egyedül a konvektív sebesség mérése, konkrét számítása okoz nehézséget.

A probléma onnan fakad, hogy az eleveniszapos technológiánál mind a biofilmet hordozó iszappelyhek, mind a lebontandó szubsztrátot szállító víz is mozog (lásd 3. ábra). A relatív sebesség - amely a w konvektív sebességgel azonos - folyton változik. A szemmel is



3. ábra Eltérések, egyezőségek

megfigyelhető mozgás sebessége nagyságrendekkel nagyobb, mint a partiszűrés rendkívül alacsony szűrés sebessége.

Szót kell ejteni még a D_s diffúzió tényezőről. A szennyvíz számos szennyező molekulát tartalmaz. A víz tisztulásához ezeket a molekulákat kell elbontani, amelyeknek a diffúziós tényezője különböző ugyan, de a hőmérsékleti koefficiens nagysága minden molekula esetén ugyanaz. A molekulák diffúziós tényezőjét $25\text{ }^\circ\text{C}$ -on szokás megadni. Más hőmérsékletekre történő átszámítás

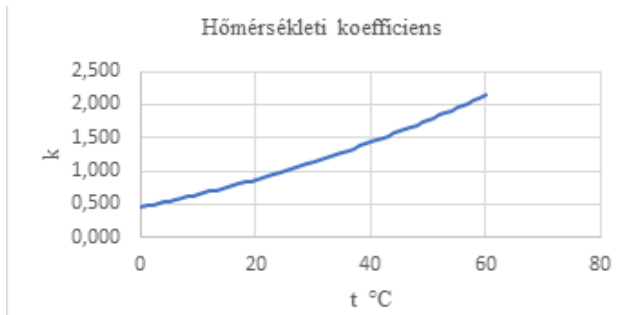
a $k(t)$ hőmérsékleti koefficiens segítségével történik.

$$D_s = k(t) D_s|_{t=25\text{ }^\circ\text{C}} \quad (3)$$

A méréssel meghatározott hőmérsékleti koefficiens függvényt a 4. ábra mutatja.

forrás: www.erc.montana.edu/biofilmbook

Összefoglalóan érdemes még hangsúlyozni: a partiszűrés és a szennyvíztisztítás között molekuláris értelemben nincs különbség.



4. ábra A diffúziós tényezők hőmérséklet-függése

A biofilmekben dolgozó baktériumok nem tudják, hogy ők most ivóvíztisztításban vagy szennyvíztisztításban vesznek részt. Egyetlen dologban érdekeltek, hogy életterükbe, a biofilmbe bejutó tápanyagot lebontsák. A lényeges különbség a biofilmhordozó közeg (homokszemcse, iszapkehely) és tápanyagot szállító víz egymáshoz képesti mozgásviszonyában van.

Hasonlóképpen fontos megállapítani: a víz szennyezése az bakteriális nézőpontból tápanyag.

A partiszűrőnél a folyóvíz, illetve a szennyvíztisztításnál a szennyvíz terheltsége (szennyezettsége) természetesen nem azonos. Sőt köztük nagyságrendi a különbség. Ez a kérdés azonban nem a mit, hanem a mennyit kell lebontani méretezési problémák közé tartozik.

2. CÉLKITŰZÉSEK

„Newton törvényei, Maxwell egyenletei axiómák. Nem azért igazak, mert közvetlenül beláthatók, hanem azért, mert a belőlük levont következtetések megegyeznek a valósággal.” – mondta Simonyi Károly. Hasonlóképpen a fenti elméleti megfontolások attól lesznek gyakorlatszámára hasznosak, ha igazolhatók. A következőkben az (1) képlet felhasználásával általánosabb magyarázatot adok a biológiai víztisztítás, így a szennyvíztisztítás egyes

fogalmainak. A tápanyaglebontás hatékonyságának számszerűsítése teremti meg ehhez a lehetőséget. Az esetek többségénél azonban nem közvetlenül a hatékonyság mértéke számolható ki, hanem csak a beavatkozások előtti és utáni állapotok különbsége, vagyis a változás mértéke adható meg.

3. A BIOFILM TÁpanyagELLÁTÁSÁNAK NÖVELÉSE A SZENNYVÍZTISZTÍTÁSBAN

3.1 Az eleveniszapos medence

3.1.1 A recirkuláció szerepe

A szennyvíztisztítási technológiáknál az iszap-recirkuláció szükségességéről hagyományosan a következő gondolatsor mentén érvelnek:

A szennyvíztisztítás első technológiai lépcsője a mechanikai előtisztítás, amely a fizikai művelet. A durva szennyezés – a rácsszemét – leválasztása után az előüleptető medencében az iszap jelentős részének leválasztása is megtörténik. A következő, második lépcsőben már biológiai folyamatok zajlanak. Itt az oldott állapotban lévő szennyező molekulák elbontása révén tovább tisztul a víz. Az úgynevezett eleveniszapos medencéből a víz és iszap keveréke az utóüleptetőbe kerül, ahol fázisok (víz és iszap) szétválasztása zajlik. A megtisztult víz az élő vízfolyásba kerül. A kiülepedett iszap egy részét – az állandó sejtkoncentráció megtartása érdekében – visszavezetjük a biológiai reaktortérbe. Az iszap fennmaradó része – a fölő iszap – az előüleptetőben leválasztott nyersiszappal kevert iszapként további stabilizálási folyamatokon esik át. (Jurecska, 2015)

Egy másik gondolatmenetet szerint:

A telepre beérkező szennyvíz szárazanyagtaralma nagyon alacsony. A cca. 1 g/kg szilárd fázisú iszapflokulátumon az exponenciális gyorsasággal szaporodni akaró baktériumtömeg nem tud letelepedni. Tetemes mennyiségű felület hiányzik ehhez. Új szennyvíztelep beindításakor a szennyvíz „beoltásához” egy másik telepről eleveniszapot hozunk, egyszeri módon így kiegészítve a hiányzó felületet. A működés során is folyamatosan szükség van a hiányzó felület pótlására. Az iszaprecirkuláció alapvetően ezt szolgálja. A baktériumok megtapadásához szükséges felületnagyság így biztosítható.

A hagyományos érvelésnél használt sejtkoncentráció nehezen számszerűsíthető fogalom. A gyakorlatban egyértelmű mérőszámot nem fűzhetünk hozzá. Ezzel szemben a felületnagyság, a hőmérséklet könnyen mérhető.

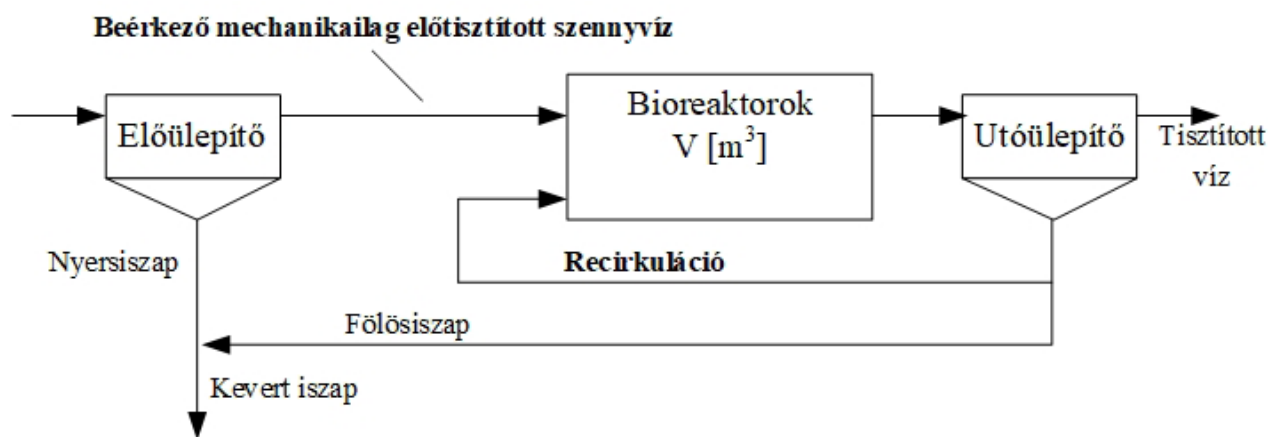
Az (1) összefüggés alapján a vízben lévő szennyezés eltávolítása, azaz a szubsztrát molekulák lebontása a Pe-számtól fordított arányban függ.

Az eleveniszapos medence esetében - elsősorban a konvektív sebesség erősen változó jellege miatt - a Pe-szám egzakt kiszámítása, de még becslése is nehézkes. A Pe-szám változásának mértéke azonban jól követhető. Ehhez induljunk ki a 5. ábrán vázolt egyszerűsített sémából.

A számításokhoz használjuk egy valódi szennyvíztelep adatait (1. táblázat)

Az anyagmérlegben résztvevő iszapminőségek jellemzőit a 2. táblázat mutatja.

Ha a reaktorteret csak beérkező szennyvízzel töltenénk meg ($r=1$), úgy az egyenértékű



5. ábra Az eleveniszapos szennyvíztisztítás vázlata

Beérkező szennyvíz	Recikláció mértéke		Hidraulikai tartózkodási idő	Bioreaktor térfogat	Térfogatarányok a reaktorban	
	[m ³ /h]	[m ³ /d]			[-]	[-]
Q	q		HRT= V/(Q+q)	V	(HRT*Q)/V	(HRT*q)/V
20000	100	2400	0,79	17600	0,90	0,10
10000	85	2040	1,46	17600	0,83	0,17
				átlag	0,865	0,135

1. táblázat Az anyaghányadok

	Jel	Dimenzió	Beérkező szv. (nyersiszap)	Recirkulációs iszap
fajlagos felület	a	[m ² /g]	7,5	9,3
szárazanyag tart.	sza	[g/kg]	1	8,6
iszapsűrűség	ρ	[kg/m ³]	1000	1000
Térfogathányad	r	[-]	0,865	0,135

2. táblázat Iszapjellemzők

szemcseátmérő a 2. táblázat adatainak felhasználásával

$$d_e = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a * sza * \rho * r * V} = 6 \frac{V}{7,5 * 1 * 1000 * 1 * V} = \frac{6}{7500} = 8 * 10^{-4} \text{ m} \quad (4)$$

ahol

V a reaktor térfogata, F a benne rendelkezésre álló biofilmhordozó felület nagysága.

Az a fajlagos felületet a következőképpen mérjük:

Az iszapmintákat szárítószekrényben tömegállandóságig szárítjuk. A kapott szárazanyagból m1 mennyiséget szén-tetrakloridra nézve telített gőztérbe helyezünk, és figyeljük a tömeg növekedését. Az egyensúly beállta után a mért tömeg m2 lesz. Az (m2-m1) tömegnövekedésből a következő képlet felhasználásával számolható a fajlagos felület nagysága: $a \text{ (m}^2/\text{g)} = 107,64 \times \text{adszorbeált gőzmennyiség (m}^2\text{-m1/m1)} / 153,82$

ahol

a szén-tetraklorid moláris tömege 153,82

Recirkuláció esetén a reaktortérben elkeverten kétfajta iszapminőség van jelen. Az egyenértékű szemcseátmérőt a (3) képlet logikája alapján ekkor a következőképpen számolhatjuk:

$$d_{e,recirk} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{7,5 * 1 * 1000 * 0,865 * V + 9,3 * 8,6 * 1000 * 0,135 * V} = \frac{6}{6488 + 10797} = \frac{6}{17285} = 3,47 * 10^{-4} \text{ m} \quad (5)$$

A számokból jól látható a recirkuláció erőteljes felületnövelő hatása, amelyet a d_e és $d_{e,recirk}$ egyenértékű szemcseátmérők különbsége alapján érzékelünk.

Hogy az iszaprecirkuláció milyen módon befolyásolja a tápanyaglebontás hatékonyságát, ahhoz Pe -számok reciprokának arányát kell meghatározni.

$$\frac{\Delta S_{recirk}}{\Delta S} \square \frac{1}{Pe_{recirk}} = \frac{Pe}{Pe_{recirk}} = \frac{\frac{d_e w}{D_s}}{\frac{d_{e,recirk} w}{D_s}} = \frac{d_e}{d_{e,recirk}} = \frac{8 * 10^{-4}}{3,47 * 10^{-4}} = 2,3 \quad (6)$$

ahol

a w konvektív sebesség nagysága és a DS szubsztrát diffúziós tényező értéke nem ismert. Ezek a jellemzők a recirkuláció nélküli, illetve a recirkulációs esetekben azonban egyformák. Velük az arány képzésénél egyszerűsíteni lehet. Így a tápanyag lebontás aránya az egyenértékű szemcseátmérők arányával lesz azonos.

Mint az látható, a recirkuláció a tápanyaglebontás hatékonyságát erőteljesen javítja. Számpéldánkban a kereken 2,3-szoros mérték elsősorban az iszap besűrűsödése, a szárazanyagtartalom növekedése révén érhető el.

Könnyen belátható, hogy a recirkuláció mértékének további növelése egy idő után már nem lesz hatásos, mert a beérkező hányad a korlátos reaktortérfogat miatt egyre csökken.

3.1.2 Hatékonyságrömlés télen

A nyári és a téli üzem között a hőmérséklet megváltozása jelenti a leglényegesebb különbséget. Nyáron mezofil, télen pszichofil hőmérsékleti tartomány a jellemző. A diffúziós tényező nagysága télen alacsonyabb, ahogy azt a diffúziós tényezők hőmérséklet függése mutatja. Legyen a nyári szennyvíz hőmérséklet 22°C , a téli 10°C .

$$D_{S,nyáron} = k(t)_{t=22^{\circ}\text{C}} D_S|_{t=25^{\circ}\text{C}} \quad (7)$$

$$D_{S,télen} = k(t)_{t=10^{\circ}\text{C}} D_S|_{t=25^{\circ}\text{C}} \quad (8)$$

A nyári és a téli tápanyag lebontás aránya a korábbiaknak megfelelő módon számolható. Az arány meghatározásához a konkrét értékeket az 4. ábrából nyerjük.

$$\frac{\Delta S_{nyáron}}{\Delta S_{télen}} \square \frac{1}{Pe_{nyáron}} = \frac{Pe_{télen}}{Pe_{nyáron}} = \frac{\frac{d_e w}{D_{S,télen}}}{\frac{d_e w}{D_{S,nyáron}}} = \frac{D_{S,nyáron}}{D_{S,télen}} = \frac{k(t)_{t=22^{\circ}\text{C}}}{k(t)_{t=10^{\circ}\text{C}}} = \frac{0,923}{0,647} = 1,43 \quad (9)$$

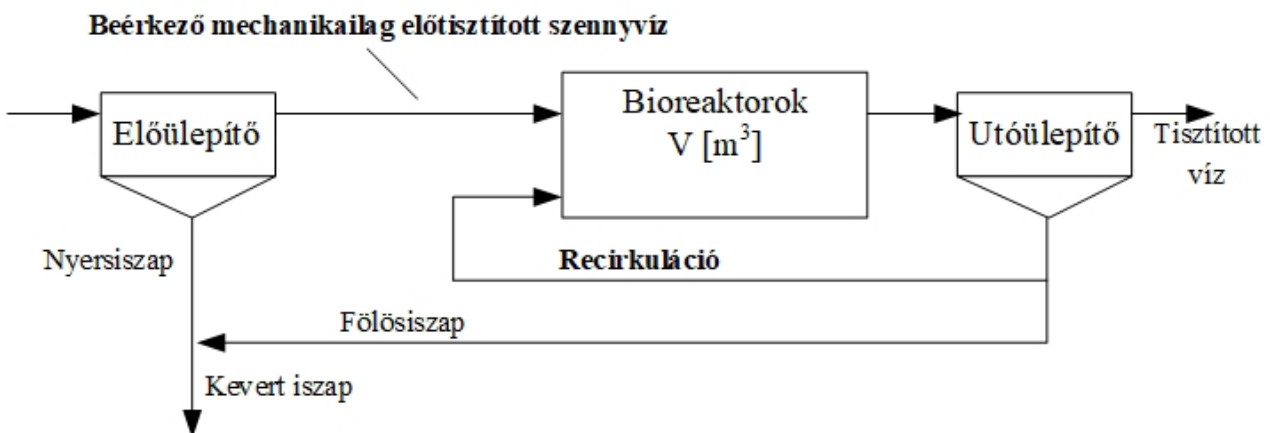
A (9) képlet alapján nyáron a tápanyag lebontó képesség 1,43-szoros mértékben lesz nagyobb, mint télen. A hőmérséklet

csökkenésből elszenvedett tisztítóhatás csökkenést az iszapkor növelése révén próbáljuk meg kompenzálni. Az iszapkor megemelése a recirkulációs hányad növelésével jár, ami az átfolyó kapacitás beszűkülését jelenti. A biológiai tisztítóképeség ugyan csökken, de nem lehetetlenül el. Az iszapkor növelése a hagyományos alkalmazott beavatkozás, amely a szennyvíztelep szinte teljes leállítását okozza. Fogalmazhatunk úgy is, hogy a hőmérsékletváltozás kompenzálására adott válaszlépés nem a legelőnyösebb.

3.1.3 Hatékonyság növelés a kavitron alkalmazásával

A téli kedvezőtlen viszonyok ellensúlyozására kínálkozik egy másik lehetőség is. A telepre beérkező, mechanikailag előtisztított szennyvizet vessük alá kavitronos kezelésnek. A beavatkozás helyét lásd a 6. ábrán).

A kavitron a Weir Minerals által gyártott szivattyú, amelynek járókereke nem szokványos járókerék. A speciális járókereket egymásba nyúló álló és mozgó tuskesor alkotja (lásd 7. ábrán). A gépben, szemben a normál szivattyúkkal a kavitáció kialakulása kívánatos.



6. ábra A beavatkozás helye



7. ábra A kavitron szétszerelt állapotban

A kavitáció roncsoló hatása a szennyvíziszap pelyheit éri, a pelyhek apozódásával előállítva a baktériumok által belakható nagyobb felületet.

A kavitront adalékanyagok (szén, zeolit) és a szennyvíziszap összekeveréséhez is használják (Stadler, 2013) A 8. ábra szerint az adalékanyagok hozzáadása szakaszos üzemben történik. Az eljárás végén kapott mix az adhéziós megkötés révén stabil termék lesz, amelyet még vízteleníteni kell.

A kavitáció roncsoló hatásának mérései a 8. ábrán bemutatott kísérleti berendezésen kerültek elvégzésre. A berendezés tartályába mechanikailag előtisztított szennyvíz került betöltésre. Ez az iszapminőség érkezik az eleveniszapos reaktorterébe is.

A kavitációs zónán történő többszöri áthaladás során az iszap fajlagos felülete növekedett. A mérések eredményét a 3. táblázatban láthatjuk.

A mért értékek segítségével kiszámolható az egyenértékű szemcseátmérő, amely a recirkuláció és a kavitációs kezelés együttes hatására jön létre:

$$d_{e,recirk+kavitron} = 6 \frac{V}{F} =$$

$$= 6 \frac{V}{10 * 1 * 1000 * 0,865 * V + 9,3 * 8,6 * 1000 * 0,135 * V} =$$

$$= \frac{6}{8650 + 10797} = 3,09 * 10^{-4} \text{ m} \quad (10)$$

A (10) képlet eredménye alapján az egyenértékű szemcseátmérő tovább csökken és vele megadható a kavitronos kezelés hatékonyság növelő mértéke

$$\frac{\Delta S_{recirk+kavitron}}{\Delta S_{recirk}} = \frac{d_{e,recirk}}{d_{e,recirk+kavitron}} = \frac{3,47 * 10^{-4}}{3,09 * 10^{-4}} = 1,12 \quad (11)$$

A kavitronos kezelés tehát hatékonyság javulást hoz, amely részben ellensúlyozni képes a téli üzem negatív hatását. Ehhez a (6) és (11) képletek eredményét kell csak összevetni. A recirkuláció fokozása a kihasználható reaktortér térfogatát csökkenti, hisz a visszaforgatás teret vesz el a folyvást újonnan érkező szennyvíztől. A kavitációs kezelés ezzel szemben nincs hatással a kihasználható térfogatra, mert a felületnövekedést az iszapon éri el. Hátrányként jelentkezik viszont, hogy a kavitron hajtásához villamos energiára van szükség, amely az üzemeltetési költségeket növeli.

A 4. ábrán a kavitron szívóvezetékéhez csatlakozik egy légbeszívó állócső is. A vezeték elzáró csap megnyitásával az injektorhatás elvén levegő beszívása történik meg. Így az oldott oxigén szintje a szokványos 4,53 mg/literről 8,13 mg/literre volt növelhető. A kavitronos kezelés tehát nemcsak a felületet, hanem az oxigénszintet is növelni képes. A fúvók teljesítményigénye válik ezáltal csökkenthetővé. Ez a kavitron alkalmazásának másik fontos eredménye.

A változás ehhez képest a gyökérzet megjelenése, azaz a reaktortérben a nyersiszap, a recirkulációs iszap mellett megjelenik egy harmadik felülettel rendelkező elem, a gyökérzet is. A (2) képlet nevezője ennek megfelelően kiegészül egy további taggal, a gyökérzet felületével. A módosított képlet így a de recirk+élőgépet egyenértékű szemcseátmérőt adja meg.

A gyökérzet által képviselt felület a következő képlettel számolható:

$$F_{\text{gyökérzet}} = a_{\text{gyökérzet}} * 1000 * m_{\text{gyökérzet}} * r_{\text{gyökérzet}} * V \quad (12)$$

Az r térfogati arány értelemszerűen a három összetevőre nézve összegzetten 1-es értéket ad.

Az élőgép tápanyaglebontási hatékonyságának javulása a (12) képlettel kiegészítve számolható, csak most értelemszerűen a de, recirk / de recirk+élőgép arányt kell meghatározni.

3.1.5. A mozgóágyas biofilm reaktor

A mozgóágyas biofilm reaktor (MBBR, Moving Bed BioReactor) sem egy merőben új eljárás (Oláh, 2021). Az eleveniszapos reaktortérbe műanyag biofilm hordozó elemek ömlesztve kerülnek betöltésre (lásd 10. ábra) Mozgatásuk a levegő hozzávezetésével történik. Szerepük a gyökérzet szerepével azonos. Forrás: <http://www.wassercare.com/aquaculture.htm>

A reaktortérben keletkező többlet felületet az élőgépes eljáráshoz hasonlóan számíthatjuk ki.

A műanyag elemek fajlagos felületét, a_V [m²/m³] a gyártó adja meg. A felület



10. ábra Az MBBR felületnövelő műanyag elemei

kiszámításához a reaktortérbe helyezett műanyag elemek a reaktortérfogatra vetített fajlagos térfogatának, V_{MBBR} [m³/m³] ismerete szükséges. A térfogathányadot, r [-] pedig megbecsüljük.

Most is meghatározzuk a (5) képlettel a recirkulációval működő eleveniszapos eljárás de, recirk, egyenértékű szemcseátmérőjét. Az előbbieknél megfelelően ez lesz a viszonyítási alap.

A változás ez esetben a műanyag elemek bekeveréséből fakad, azaz a reaktortérben a nyersiszap, a recirkulációs iszap mellett megjelenik egy harmadik, felülettel rendelkező elem az MBBR műanyag is. A (5) képlet nevezője ennek megfelelően kiegészül ezen elemek felületével. A módosított képlet így a de recirk+MBBR egyenértékű szemcseátmérőt adja meg.

A műanyag elemek által képviselt felület a következő képlettel számolható:

$$F_{MBBR} = a_{V,MBBR} * V_{MBBR} * r_{MBBR} * V \quad (13)$$

Az r térfogati arány értelemszerűen a három összetevőre együtt kell vonatkozzon, összegük most is 1 értékű.

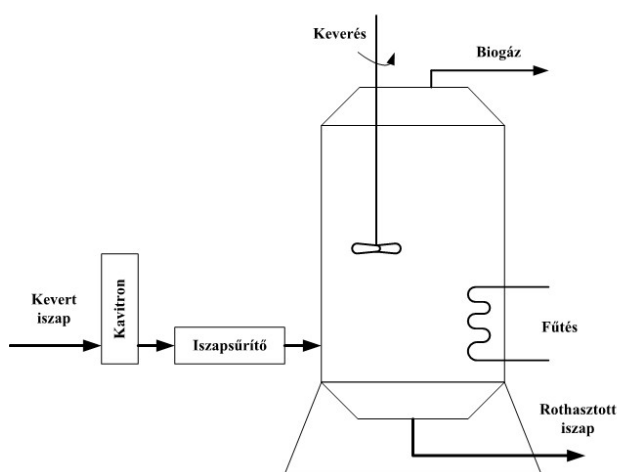
Az MBBR tápanyaglebontási hatékonyság javulásának kiszámításához most is a (6)

képletet használhatjuk, csak most a de, recirk / de recirk+MBBR arány lesz a meghatározó.

Az elmélet általánosságának hangsúlyozása érdekében az élőgép (Live Machine) és a Moving Bed Bio Reactor példáinál konkrét számadatokat hiányában csak a képleteket lehet leírni.

3.2 A biogáztermelés fokozása

Napi gyakorlat, hogy a biogáztermelés növelése érdekében a rothasztó toronyba kerülő iszapot sűrítjük, illetve magát a rothasztó tornyot fűtjük. Az előző pontban alkalmazott megfontolások segítségével a műveletek hatékonyságjavulását számszerűsíteni is tudjuk.



11. ábra A rothasztó torony hatékonyságának növelése

		Kevert iszap	Sűrített iszap	Megjegyzés
fajlagos felület	[m ² /g]	<i>a</i>	<i>a</i>	az iszapsűrítés hatására nem változik
szárazanyag tart.	[g/kg]	30	54	
sűrűség	[kg/m ³]	1300	1400	

4. táblázat Iszapjellemzők rothasztás előtt

3.2.1. Az iszapsűrítés hatása

Induljunk ki az iszapminőségek adataiból.

Az egyenértékű szemcseátmérő a táblázat adatainak és jelöléseinek felhasználásával a sűrítés előtti állapot

$$d_{\text{sűrítés előtti}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a * 30 * 1300 * V} = \frac{6}{a * 30 * 1300} \quad (14)$$

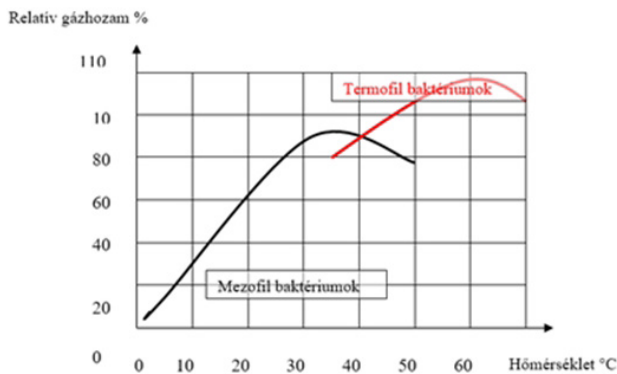
Az egyenértékű szemcseátmérő a táblázat adataival és jelölésével a sűrítés után

$$d_{\text{sűrítés után}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a * 54 * 1400 * V} = \frac{6}{a * 54 * 1400} \quad (15)$$

A sűrítésnek a tápanyaglebontásra gyakorolt hatása:

$$\frac{\Delta S_{\text{sűrítés után}}}{\Delta S_{\text{sűrítés előtt}}} = \frac{1}{Pe_{\text{sűrítés után}}} = \frac{Pe_{\text{sűrítés előtt}}}{Pe_{\text{sűrítés után}}} = \frac{d_{\text{sűrítés előtti}} w}{D_s} = \frac{d_{\text{sűrítés utáni}}}{d_{\text{sűrítés előtti}}} = \frac{54 * 1400}{30 * 1300} = 1,94 \quad (16)$$

A *w*, konvektív sebesség, a *D_s*, szubsztát diffúziós tényező és az *a*, fajlagos felület ugyan nem ismert mennyiségek, de a sűrítés hatására nem is változnak, ezért az arányképzésénél egyszerűsíthetünk velük. A számszerűsítés után levonható a következtetés: a sűrítés kerekén kétszeres hatékonyságnövelést eredményez a rothasztó toronyban.



12. ábra A gázhozam hőmérsékletfüggése

3.2.2 A rothasztótorony fűtése

Hasonlóképpen mutatható ki a hőmérséklet növelésnek – rothasztó torony fűtésének a hatása is. A szakirodalomban nagyon sokszor lehet találkozni a következő ábrával.

A 12. ábra azt sugallja, miszerint a mezofil baktériumok kevésbé hatékonyan „dolgoznak”, mint termofil társaik. Ez azonban valószínűleg nincs így, a kép félrevezető. Csak annyi mondható, hogy a mezofil hőmérsékleti tartományban (30-40 °C) a mezofilnek nevezett baktériumok, illetve a termofil hőmérsékleti sávban (50-70 °C) a termofilek alkotják többségében a mikroba közösséget.

Hőmérsékletfüggése azonban a biofilmben igyekvő szubsztrát molekulák diffúziós tényezőjének van. A Stokes-Einstein összefüggés értelmében minden molekula diffúziós tényezője azonos módon függ

a hőmérséklettől. Az 4. ábrának megfelelően a méréssel meghatározott hőmérsékleti koefficiensekkel a diffúziós tényezők rendre az alábbiak lesznek

$$D_{S,mezofil} = k(t)_{t=35^{\circ}C} D_S|_{t=25^{\circ}C} \quad (17)$$

$$D_{S,termofil} = k(t)_{t=60^{\circ}C} D_S|_{t=25^{\circ}C} \quad (18)$$

Helyettesítve az értékeket

$$\frac{\Delta S_{termofil}}{\Delta S_{mezofil}} \square \frac{1}{Pe_{mezofil}} = \frac{Pe_{mezofil}}{Pe_{termofil}} = \frac{D_{S,mezofil}}{D_S} = \frac{D_{S,termofil}}{D_{S,mezofil}} = \frac{k(t)_{t=60^{\circ}C}}{k(t)_{t=35^{\circ}C}} = \frac{2,133}{1,279} = 1,67 \quad (19)$$

Megállapítható, hogy a hőmérséklet növelés hasonló mértékben javítja a gázkihozataalt, mint a sűrítés.

3.2.3 Iszapelőkészítés a kavitron segítségével

A rothasztó toronyba kerülő iszap előkészítése nem csak sűrítésből állhat, kavitronos kezelésnek is alávethető. A kavitációs zónán történő átvezetés a dezintegrációs eljárások közé tartozik és az iszapapályák aprítását idézi elő, miáltal a mikrobák által belakható felület növekszik. A hatás a fajlagos felület mérésével számszerűsíthető. A méréseket a 8. ábrán vázolt kísérleti berendezésen végeztük. A keverőtartályba most a rothasztó torony bemeneti iszapminőségét adó kevert iszap került. A mérések eredményét a 5 táblázatban foglaltam össze. A kavitációs zónán történő átvezetés a szárazanyag tartalomra és a sűrűségekre nincs

		Kevért iszap kavitronos kezelés előtt	Kevért iszap kavitronos kezelés után	Megjegyzés
fajlagos felület	[m ² /g]	32	37	
szárazanyag tart.	[g/kg]	sza	sza	nem változik
sűrűség	[kg/m ³]	ρ	ρ	nem változik

5. táblázat Kevért iszap jellemzői a kavitronos kezelés előtt és után

érdemi hatással, csak a fajlagos felület változik. A változatlanságot a 5. táblázatban az azonos betűjelek mutatják.

Helyettesítve a táblázat ismert (mért) és ismeretlen adatait, az egyenértékű szemcseátmé-
rők az alábbiak szerint alakulnak:

$$d_{\text{elő,kavitronozás el}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{32 * sza * \rho * V} = \frac{6}{32 * sza * \rho} \quad (20)$$

$$d_{\text{e, kavitronozás után}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{37 * sza * \rho * V} = \frac{6}{37 * sza * \rho} \quad (21)$$

Hasonlóképpen az előzőekhez, vegyük a lebontás arányát, amikor is több tényezővel egyszerűsíthetünk:

$$\frac{\Delta S_{\text{kavitronozás után}}}{\Delta S_{\text{kavitronozás előtt}}} = \frac{1}{\frac{Pe_{\text{kavitronozás után}}}{Pe_{\text{kavitronozás előtt}}}} = \frac{Pe_{\text{kavitronozás előtt}}}{Pe_{\text{kavitronozás után}}} = \frac{d_{\text{e, kavitronozás előtt}} w}{d_{\text{e, kavitronozás után}} w} = \frac{d_{\text{e, kavitronozás előtt}}}{d_{\text{e, kavitronozás után}}} = \frac{37}{32} = 1,16 \quad (22)$$

A hatékonyságjavulást végül a kavitációs be-
hatás utáni és előtti egyenértékű szemcseát-
mérők aránya adja.

A dezintegrációs iszapelőkészítés továb-
bi 1,16-szoros javulást hoz. Az iszapsűrítés,
a rothasztó torony fűtése és a dezintegrációs
iszapelőkészítés hatása együttesen a javulás
mértéke, amely $1,81 * 1,67 * 1,16 = 3,76$ -szoros
lesz a kezelés nélküli állapothoz képest.

Miután a rothasztó tornyok szigorúan anoxi-
kus viszonyok mellett működnek, ezért

a dezintegráció során a levegő hozzávezeté-
se a kavitronnál kerülendő.

A 6. és 11. folyamatábrák csak a kavitron be-
építési helyét jelölik. A folytonos vagy szaka-
szos üzemű (batch) beépítési változatok nem
kerültek kipróbálásra. A kavitációs roncsolás
mértéke csak a kísérleti berendezésen (lásd
8. ábrán) került meghatározásra. Az itt mért
értékek alapján a várható hatékonyság növe-
kedés nagyságának kiszámítása történt csak
meg. Hogy valójában mennyi a biogáz több-
let, azt még valós körülmények között ki kell
mérni.

4. A BIOFILMEN BELÜLI VISZONYOK BEFOLYÁSOLÁSA

A biofilmben juttatott tápanyag végül a biofil-
men belül bomlik le. A biokémiai folyamat
feltételeinek javíthatóságáról egyelőre még
kevés az ismeret.

Vincent feltérképezte a patogén baktériumok
életfeltételeit (Ország). A pH-rH₂ síkon egy
tartomány rendelhető egy-egy mikroba faj-
tához, amelyen belül ők jól érzik magukat.
A patogén mikrobák elleni küzdelem abban
áll, hogy kedvező környezetükből kiszakítva
életfeltételeik megszűnnek. Fordítva, a tá-
panyag lebontásban résztvevő baktériumok
esetében a feltételek javítása abban nyilvánul-
hat meg, hogy számukra kívánatos klimatikus
viszonyokat teremtünk.

A mikrobák életviszonyainak ilyen módon
történő gátlásáról és fokozásáról egyelőre
meglehetősen gyérek az információk. Az biz-
tosan tudható, hogy a fertőtlenítés a mikrobiá-
lis élet beszűkítésére szolgál. Megfigyelték azt
is, hogy a kavitációs zónán átvezetett víznek

	Víz típus [-]	pH	ORP	t	rH ₂ számítva
		[mV]	[°c]	[-]	
1	Folyóvíz	7,8	128	16,1	27,49
2	Kútvíz	7,8	119	16,6	27,15
3	Ózon adagolás után	7,4	148	15,4	27,41
4	Aktívszén szűrés után	7,5	140	15,8	27,32
5	Klórozás után	7,4	157	16,2	27,69

6. táblázat Az oxidálószer adagolásának hatása

kedvező élettani hatása van az öntözött növények fejlődésében.

Próbáljuk meg a pH-rH₂ síkon ábrázolni ezen ellentétes kimenetelű folyamatokat.

Tekintsünk előbb a fertőtlenítés, a mikrobiális élet gátlásának esetére. A 6. táblázatban víztisztítási fokozatok jellemző adatait látjuk.

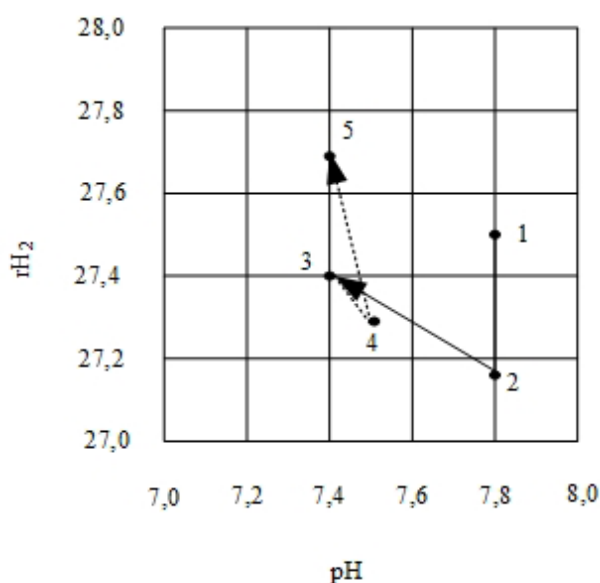
A folyó (Duna) vize természetes partiszűrés után kerül a kutakba. A megengedettnél nagyobb vas és mangántartalmú kútvizet ózon kezelésnek vetik alá. Innen a víz a homokszűrőre kerül. Az aktívszén szűrést követően fertőtlenítő klórozás után jut a hálózatba.

A víztisztítási folyamat pontjain mérve a pH és redoxpotenciál értékeket megmutatható az oxidálószer – az ózon és a klór hatása, amelyet a 13. ábra nagyításban szemléltet. Az oxidálószer adagolása a perempontok felől a belső semleges területek irányába történő elmozdulást okoz.

A kavitronos kezelésnek alávetett víz és szennyvíz a kezelésektől előtti és utáni elektrokémiai jellemzőit a 7. táblázat foglalja össze.

A táblázat adataiból egyértelműen kitűnik, hogy a kavitációs zónán történő áthaladás a vízben elektrokémiai változásokat hoz létre. A kavitronos kezelés hatása a Vincent-diagramon az előbbiekkal ellentétben belülről kifelé irányú elmozdulást okoz. A 14 ábrán berajzoltuk a 13. ábrán nagyítva ábrázolt oxidálószer adagolásának hatását is.

A mérési eredmények alapján csak a ténymegállapításig juthatunk el, miszerint a kavitációs zónán történő áthaladás növeli a pH-t és növeli az rH₂-t, a Vincent-diagramon az elmozdulás mértéke ugyan a különböző médiumok esetén más és más, de az irány azonos. Az azonban nem közömbös, hogy ez az elmozdulás a Ne = 0 vonal felett vagy alatt történik. Hogy a megváltozott elektrokémiai



13. ábra Az oxidálószer hatása (nagyításban)

Víz típus [%]		Száras anyag	pH		ORP		t		rH ₂ (számítva)	
			[-]		[mV]		[°C]		[-]	
	Kavitronos kezelés		előtt	után	előtt	után	előtt	után	előtt	után
1	Víz	0	7,63	8,11	-142	-124	25,6	25,9	17,4	19
2	Szennyvíz	0,1	7,71	8,72	-447	-300	23,3	28,7	7,3	14,2
3	Kevert iszap	3,1	6,64	7,68	-337	-240	23,3	30,5	8,9	14,1
4	Rothasztott iszap	3,6	7,80	8,52	-333	-249	30,5	36,3	11,3	15,4

7. táblázat A kavitronos kezelés hatása

környezet mit jelent a növények fejlődésében, az további, a szakmán messze túlmutató vizsgálatot igényel. Ez lehet a kavitronos kezelésnek egy további pozitív hozadéka, amely a biofilmen belüli viszonyok jobbítását szolgálja.

Az oxidálószer kiváltotta, az életet gátló hatás pontos magyarázata is várat még magára. Úgy tűnik, a semleges pont (pH=7, rH₂=28) környezetében a biológiai élet korlátozott.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A reaktorterekben zajló biokémiai történések nem figyelhetők meg közvetlenül. Nem tudunk beszélni a baktériumok szakszervezeti bizottságának elnökével, hogy most éppen miért is van sztrájk. Csak közvetett paraméterek mérése révén lehet következtetni a valós történésekre. Ilyen paraméter a KOI és BOI₅, amely csak azt mondja meg, hogy oxigénigény csökkenése és a víz tisztulása között összefüggés van, hogy a biokémiai reakciók nagy valószínűséggel lejártszódnak. Ugyanilyen paraméter a Monod-kinetika kulcsváltozója, a mikrobaszám is. A mikrobaszám növekedéséből, a szaporodás mértékéből arra lehet következtetni, hogy a reaktortérben tápanyalebontás zajlik. A molekulaláb lebontásaként felszabaduló energia egy részét

a baktériumok saját életvitelük fenntartására, szaporodásukra használják. Ugyanilyen közvetett paraméter az ún. hozamelméletben az iszap mennyiségének növekedése is. Erre alapozzuk az eleven iszapos technológia méretezését is.

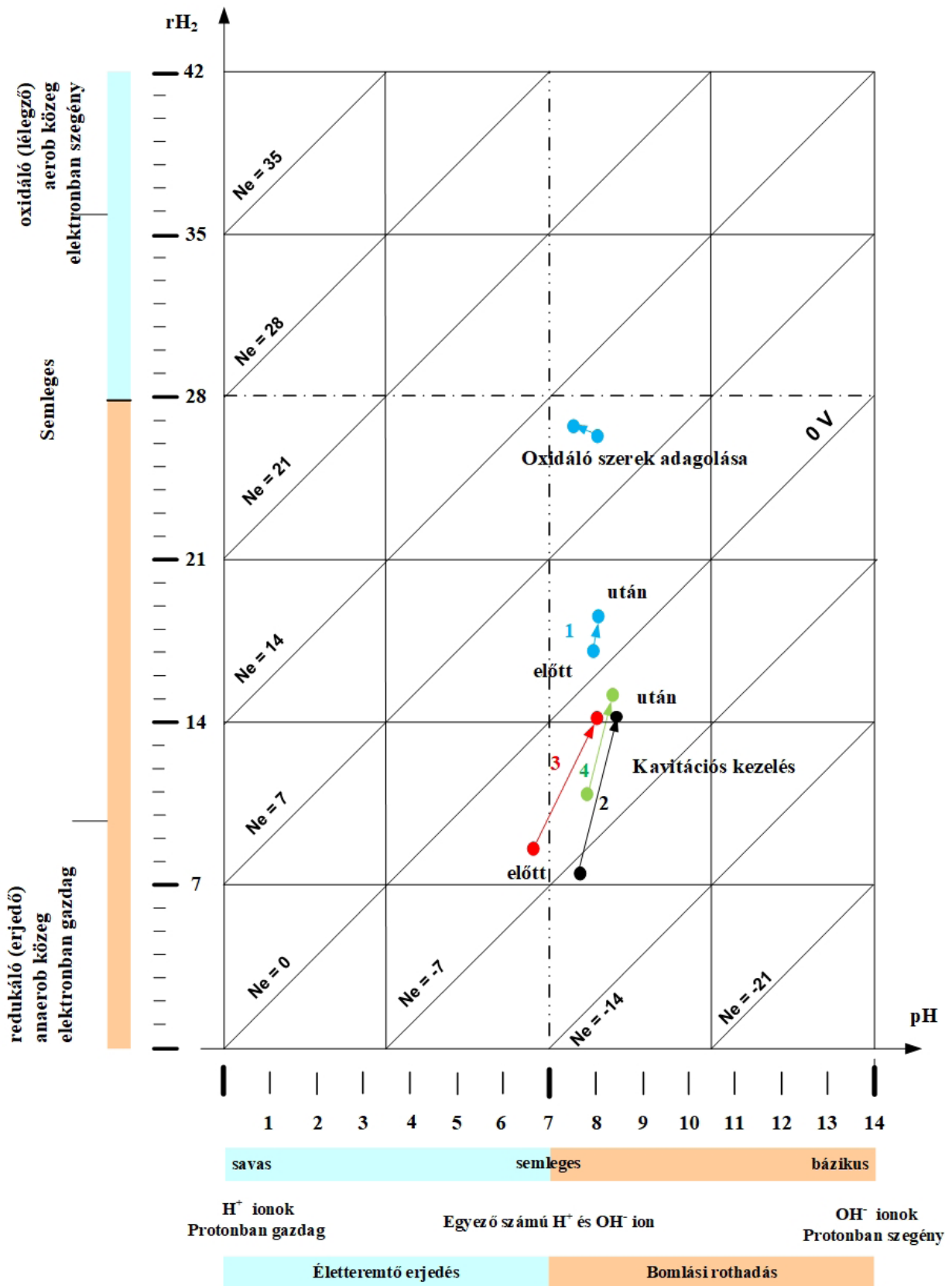
A biológiai szűrés elméletével számos, a víz-tisztításban (szennyvíztisztításban) már ismert jelenségnek más, mégpedig közvetlen magyarázata is adható. Az áramlástan és felületfizikai jellemzők által alkotott Pe-szám a tápanyagellátás logisztikai előfeltétele. Segítségével számos kérdés megválaszolása lehetséges, mint

a recirkuláció az eleveniszapos reaktortérben a felületet növeli, csökkentve ezzel a Pe-számot. A kisebb Pe-szám nagyobb lebontási hatékonyságot jelent.

Télen az iszapkor növelése rossz beavatkozás, mert a telep leállásához vezet. A hőmérséklet csökkenés negatív hatásának ellensúlyozása kavitációs rombolóhatás alkalmazása révén oldható meg.

A rothasztó tornyok fűtése, az iszap sűrítése és kavitron használatával történő dezintegráció ugyanazt a hatást váltja ki, nevezetesen a Pe-szám csökkentését, vele a biogázkihozatal fokozódását.

A fentiek igazolása számpéldákkal történt.



14. ábra Az elmozdulások ábrázolása a Vincent diagramon

A baktériumok életterének klimatikus viszonyai a pH – rH₂ síkon ábrázolhatók.

A mikrobiális élet serkentése és gátlása tipikus irányú elmozdulásokhoz vezet.

A gátlás oxidálószeres adagolásával, a serkentés kavitronos kezeléssel jöhet létre.

A baktériumi élettér hatékony befolyásolása ma nem gyakorlat még. Csupán sejtek vannak, amelyek irányultsága azonban eltér az eddig követett úttól. A Vincent-diagramon. a pH-rH₂ síkon történő mikrobiológiai

folyamatábrázolás és az itt csak megemlítésre került Ne tényező számos lehetőséget nyújt még a tápanyaglebontás pontosabb megértéshez.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kísérleteket a GINOP-2.2.1-15-2017-00068 számú innovációs projekt keretében kerültek végrehajtásra. A fajlagos felület méréseket az ELTE Mikrobiológiai Tanszéke végezte el. A szerző köszönettel tartozik a közreműködésért.

▶ HIVATKOZÁSOK

A SZERZŐRŐL:



Tolnai Béla alapszakmáját tekintve folyamattervező gépészmérnök és folyamatirányítási szakmérnök. A Fővárosi Vízműveknél eltöltött évek alatt azonban szem- és fültanúja lehetett a partiszűrés történéseinek. Üzemeltetési igazgatóként egy ideig felelősséget is viselt a főváros vízellátásában.

A biológiai szűrés elméletének kutatása köti le jelenleg figyelmét (bővebben lásd: <https://www.biomodel.hu> honlapon).