

A BIOFILMEN BELÜL ZAJLÓ FOLYAMATOKRÓL



KIVONAT A biológiai szűrés két egymást követő részfolyamatból áll. Az áramlástan és felületfizikai összefüggésekre viszszavezethető tápanyagtranszport az előfeltétele a biofilmen belül zajló biokémiai folyamatnak. A biológiai víztisztítás a szennyező molekulák lebontásáról szól, ami enzimek által katalizáltan történik. A cikk a második fázis mikéntjéről, feltételeiről és az eredményeknek a gyakorlatba történő kivetíthetőségéről szól, beleértve a biológiai reaktorterek irányíthatóságát.

KULCSSZAVAK biológiai szűrés, Ne-tényező, pH, redoxpotenciál, rH_2

TOLNAI BÉLA gépészmérnök, BioModel Bt.

Lektorálta: Dr. Márialigeti Károly, ELTE, Mikrobiológia Tanszék

1. A probléma felvetése

A kolera- és pestisjárványok idején Snow¹ Angliában arra a következtetésre jutott, hogy ezek a betegségek az ivóvíz közvetítésével terjednek [6]. Pasteur² lépene elleni kutatásai arra irányultak, hogyan lehetne a lépene-baktériumokat legyengíteni oly módon, hogy megváltoztatjuk életkörülményeiket – pl. a hőmérsékletet, a rendelkezésükre álló tápforrásokat –, vagy levegőnek tesszük ki őket [6]. Vincent³, Pasteur munkáinak követője továbblépett, és „térképen” ábrázolta egyes betegségeket okozó mikrobák kedvelt életkörülményeit, mintegy klimatikus

viszonyait. Úgy találta, hogy a pH – rH_2 dimenziótlan változók által kifeszített síkon az általa vizsgált patogének csak egy jól körbehárolt területen belül életképesek [7]. A kórokozók elleni küzdelemlről röviden ekképp vélekedett: „Vond el a betegségtől táptalaját, és akkor a betegség elhal.” A gyakorlat nyelvére lefordítva ez a pH – rH_2 környezet megváltoztatását jelenti egy olyan pontba, ahol a betegségeket okozó mikrobák életképtelenek. A biológiai víztisztítás azonban nem a baktériumokkal szembeni küzdelemlről szól, éppen ellenkezőleg, a baktériumok kellő szaporodása a kívánatos. Erősen szennyezett

2. Előzmények (a biológiai víztisztítás vázlatos folyamata)

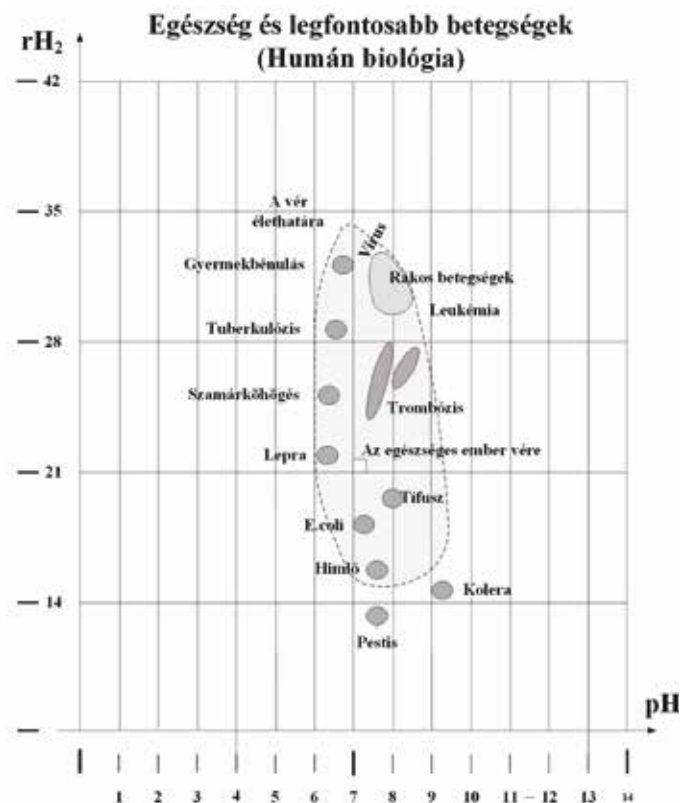
A víz biológiai úton történő megtisztítása mikroorganizmusok közreműködését igényli, amelyek a szennyezést jelentő molekulákat lebontják, átalakítják. Az ennek hatására keletkező új vegyületek már nem károsak a vízben.

A biológiai tápanyaglebontás modellezése arra vezetett, hogy a szóban forgó folyamat két egymást követő részfolyamatból áll. A biofilmhordozó közegen (homokon, flokkulumon, aktív szénen, membránon, gyökérzetten) kialakuló biológiai életterben, az ún. biofilmben a baktériumok mozognak ugyan, de érdeemben nem változtatnak helyet, ill. mikrokörnyezetet. Legfeljebb a biofilm növekedésével a fizikai helyük változik meg a rendszerben. A lebontandó tápanyagot ezért oda kell szállítani nekik, ami konvektív áramlással és diffúzióval valósul meg. A jelenség hasonlósági kritériuma a Pe-szám. Ez az előfeltételként számoltartott fizikai részfolyamat a biofilmen kívül, a víztérben zajlik.

A molekulák – így a víz szennyezését okozó molekulák is – a természetben általában stabil képződmények. Stabilitásukat az aktiválási energiaszint teremti meg. Ahhoz, hogy elbonthatók legyenek, ΔE aktiválási energia közlése szükséges. Enzimek jelenlétében azonban ez a küszöbérték lecsökken, és a molekula könnyebben átalakul, lehetővé téve újabb, kisebb molekulák vagy másképpen bomlástermékek létrejöttét.

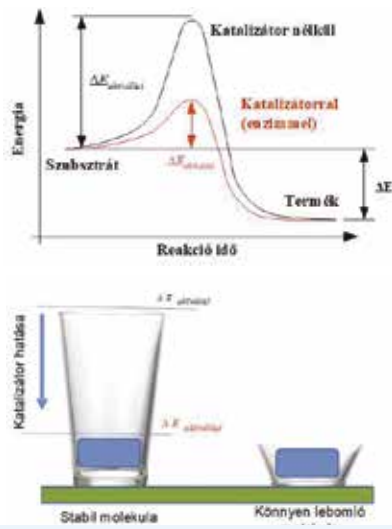
A keletkező termékek együttes energiaszintje alacsonyabb a bomlás előtti energiaszintnél, a különbség felszabadul (a 2-1. ábrán ΔE). Ezt a felszabaduló energiameennyiséget – a szubsztrát és a termékek együttes energiaszintjének különbségét – használják aztán a jelen lévő baktériumok az életvitelük fenntartásához, a szaporodásukhoz.

A 2-1. ábrán a folyadék a mély pohár alján stabil állapotban van, lapos pohárból azonban



11. ábra: A betegségek térképe a bioelektronikai Vincent-diagramon

víz megtisztításához sok „munkaerőre”, sok baktériumra van szükség. Visszajára fordítva a vincenti gondolatot azt mondhatjuk, hogy a baktériumi élet elősegítése a baktériumok által megkívánt „klimatikus” viszonyok beállításával érhető el. Minden élőlénynek, így a tápanyaglebontást végző, az egészségre veszélytelen baktériumoknak is van optimális környezetük, így kedvenc tartományuk a pH – rH_2 síkon. Az elgondolás szerint a biológiai víztisztítás hatékony megvalósításához éppen ezeket az optimális környezeti feltételeket kell tudni beállítani. Melyek ezek a feltételek? Ennek próbálunk utánajárni a következőkben.



2 1. ábra: Az enzimkatalizáció hatása és annak szemléltetése

	Sav-bázis reakciók	Redoxi reakciók
Reakció	protonátadás $H_2O + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$ (másképp $H^+ + OH^-$)	elektronátadás $H_2O + H_2O \rightleftharpoons 2H_2 + O_2$
Kémiai egyensúly	$k_w = [H^+] \cdot [OH^-] = 10^{-14}$	$k_e = [H_2]^2 \cdot [O_2] = 10^{-84}$
Vegytiszta víz	$[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ így $k_w = [H^+]^2 = 10^{-14}$	$[H_2] = 2[O_2] = 10^{-28}$ így $k_e = \frac{1}{2}[H_2]^3 = 10^{-84}$
Semleges pont	$\sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}$	$\sqrt[3]{10^{-84}} = 10^{-28}$ (pontosan $\sqrt[3]{2} \cdot 10^{-28} = 1,26 \cdot 10^{-28}$)
Definíció	$pH = \log \frac{1}{[H^+]} = -\log [H^+]$ pH = power of Hydrogen	$rH_2 = \log \frac{1}{[H_2]} = -\log [H_2]$ rH ₂ = reduction of Hydrogen ORP = Oxidation Reduction Power
Felfedező	S. P. L. Sorensen (1868-1939) dán vegyész, 1913	W.M. Clark (1884-1964) amerikai biokémikus, 1920
Vegytiszta víz	pH = 7	rH ₂ = 28
Skála	szimmetrikus skála 0 Savas közeg 7 Semleges 14 Lúgos közeg Protonaktivitás nő csökken	aszimmetrikus skála 0 Redukáló közeg (antioxidáns) (anaerob) 28 Oxidáló közeg (lélegző) (aerob) 42 semleges
Megjegyzés	Sav: protonot adó anyagok pH csökken sav hozzáadásával Lúg: protonot elnyelő anyagok pH nő lúg hozzáadásával	rH ₂ =0 H ₂ szabadulhat fel rH ₂ =42 O ₂ szabadulhat fel rH ₂ =0...42 a víz termodinamikai stabilitásának határa, ezen intervallumon kívül nem létezik víz

3 1. ábra: A pH és az rH₂ értelmezése kivonat: Ország J. [7] előadása alapján

könnyen kilocsban. Az enzimkatalizáció analóg módon tkp. a pohár falának magasságát csökkenti, azaz az aktiválási energiaszintet mérsékli, lehetővé téve a molekula könnyű elbomlását. Az enzimek a reakció szabadenergia-változását (ΔE) azonban nem befolyásolják. A természet az enzimeknek ezt a képességét használja a víz megtisztításához is.

Az enzimek szintén nagymolekulák, magában a bomlási reakcióban nem vesznek részt, maradandóan nem változnak meg, csupán lehetővé teszik, hogy egy atom, gyök egyik helyről eljusson egy másikra. Katalizátorként szolgálnak [5]. Számos enzim létezik. Egy adott molekula elbomlását azonban csak olyan enzim képes katalizálni, amelynek a „mintázata” a molekulával megegyező. A jelenséget a mintegy 100 éve ismert Michaelis–Menten-kinetika⁴ írja le, amely a szubsztrátkoncentráció függvényében a reakciósebességre ad képletet.

A baktériumok egyszéjtű élőlények. Testük javarészt enzimekből áll. A mikrobák a szubsztrátmolekulák lebontása során felszabaduló energiát „életvitelük” fenntartására és növekedésre, szaporodásra használják. A szaporodás törvényszerűségét is egyfajta kinetika, a Monod-kinetika⁵ számszerűsíti. A szaporodás mértéke is a szubsztrátkoncentrációtól függ.

Szokás a szubsztrátot a baktériumok táplálékaként is említeni. Ez azonban nem teljesen pontos meghatározás. A baktériumok nem vesznek közvetlenül részt a tápanyaglebontásban. Testük enzimekből működnek katalizátorként. Ezzel szemben az osztódással történő mikrobaszám-növekedés értelmezhető úgy, mint újabb és újabb „munkaerő csatornába állása”.

A szennyező molekulák lebontása a biofilmen belül történik. Ugyanazt a molekulát a

különböző baktériumok is lebontják. A számos jelen lévő baktérium közül az fog szaporodni, amelyeknek a biofilmben uralkodó környezeti viszonyok leginkább kedveznek.

Az „ideális munkafeltételeket” a pH (kémhatás), az rH₂ (redoximérték) és a T (hőmérséklet) együtt határozzák meg.

Oxikus (aerob) környezetben a biokémiai reakció következtében javarészt szén-dioxid és víz, anoxikus (anaerob) viszonyok mellett főként szén-dioxid és metán keletkezik. A bomlástermékek közül egyik sem számít szennyeződésnek a vízben. A szén-dioxid és a metán gázként a légtérbe távozik, vagy biogázként felfogjuk.

3. A pH – rH₂ diagram tulajdonságai

A vízben zajló reakciók alapvetően két-félék lehetnek. A sav-bázis reakciók protonátadással, a redoxireakciók elektronátadással zajlanak. A jellemzőket a 3-1. ábra foglalja össze.

A pH- és rH₂-mennyiségek nem függetlenek egymástól. A köztük levezethető összefüggés az alábbi alakot ölti [7], [8]:

$$rH_2 = \frac{2 F E_k}{RT \ln 10} + 2 pH \quad (3-1)$$

- F Faraday-állandó
- E_k redoxpotenciál a standard hidrogénelektrodára vonatkoztatva
- R egyetemes gázállandó
- T abszolút hőmérséklet

A redoxpotenciál dimenziótlan képletét Nernst-tényezőnek is szokás nevezni

$$Ne = \frac{2 F E_k}{RT \ln 10} \quad (3-2)$$

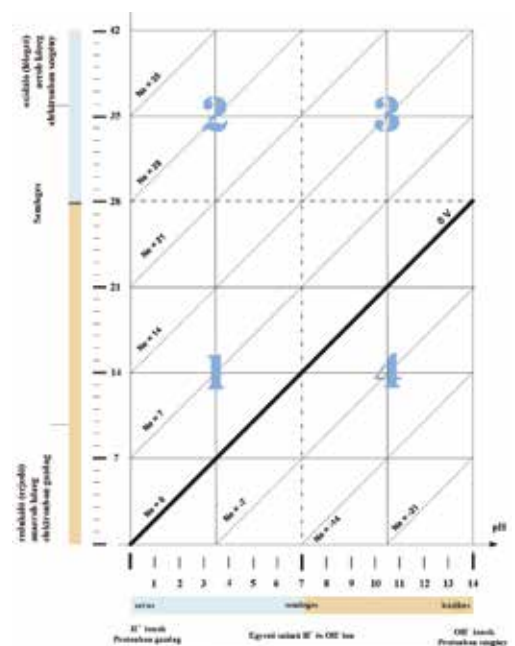
Ezzel a helyettesítéssel a pH – rH₂ összefüggés a következő alakra egyszerűsödik

$$rH_2 = Ne + 2 pH \quad (3-3)$$

Vegyük észre, hogy átrendezés után a redoxpotenciál

$$E_k = \frac{RT \ln 10}{2 F} rH_2 - \frac{RT \ln 10}{F} pH \quad (3-4)$$

két tag algebrai összege. Az első tag a víz és az oldott anyagok elektroncseréjétől, a második csak a protoncserétől függ. A pH – rH₂ változók által kifésített sík az ún. Vincent-diagram,



3 2. ábra: A Vincent-diagram és tartománya

amelyen az $Ne = \text{áll. helyek egyenesek lesznek}$. Használva a 3-1. ábra értelmezéseit négy tartomány definiálható (lásd a 3-2. ábrát). A tartományokhoz számos, a bioelektronika tudományához tartozó fogalom köthető.

Ilyen fogalmak pl. az egészséges életmódhoz fűzött éltető víz, ártalmatlan víz és a természetgyógyászat körébe tartozó más meghatározások.

A következőkben mi csak a változók által kifejlesztett síkot használjuk, amelybe a méréseink eredményeit rögzítjük. A bioelektronika szélesebb összefüggéseit nem taglaljuk.

4. A Ne- tényező szerepe a tápanyag lebontási függvényben

A dimenzióanalízis segítségével levezetett összefüggés az alábbi alakot ölti [10]:

$$\Delta S = \mu(Pe) \frac{1}{Pe} S Ne^{1/3} \frac{L_a}{d_n} \quad (4-1)$$

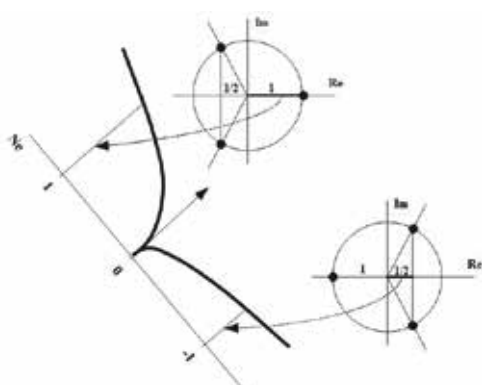
- ΔS szubsztrátfogyás
- μ szűrési tényező
- Pe Pe-szám (Peclet)
- s szubsztráttartalom
- Ne Ne-faktor (Nernst)
- $\frac{L_a}{d_n}$ geometriai viszonyszám

(L_a biológiailag aktív réteg vastagsága, d_n mértékadó szemcseátmérő)

A levezetés részleteit mellőzve most csak a Ne-tényezőre koncentrálnunk, amelynek heurisztikus módon megválasztott kitevője 1/3. A dimenzióanalízis levezetésében használt alak

$$Ne^* = \frac{F E_h}{RT} \quad (4-2)$$

csak egy konstansban tér el a (3-2) összefüggéstől.



4.1. ábra: A Ne-tényező köbgyöke

Eset	pH	t	T	F	R	ORP	korr(t)	E_h	Ne	rH_2	időpont	
	[-]	[°C]	[K]	[C/mol]	[J/(mol K)]	[mV]	[mV]	[mV]	[-]	[-]		
1 Duna víz (Dunakutató Gőd)	8,00	10	283	9,65E+04	8,31	190	214	404	0,40	14,4	30,4	
2a Kisoroszi I. kútnál a partszakaszon	8,00	21,6	294,6	9,65E+04	8,31	84	202	286	0,29	9,8	25,8	2010.07.05
2b Csepel 11 kútnál a partszakaszon	7,80	18,5	291,5	9,65E+04	8,31	128	205	333	0,33	11,5	27,1	2010.07.06
3a Soproni elevevéniszapos anoxikus med.	7,53	21,1	294,1	9,65E+04	8,31	-37	203	166	0,17	5,7	20,7	2018.07.01
3b Soproni elevevéniszapos oxikus med.	7,10	21,3	294,3	9,65E+04	8,31	-17	202	186	0,19	6,4	20,6	2018.07.01
4a Kísérleti mezofil rothasztó alsó	7,60	39	312	9,65E+04	8,31	-450	185	-265	-0,27	-8,6	6,6	
4a Kísérleti mezofil rothasztó felső	7,60	39	312	9,65E+04	8,31	-550	185	-365	-0,37	-11,8	3,4	
4b Kísérleti termofil rothasztó alsó	7,60	55	328	9,65E+04	8,31	-550	168	-382	-0,38	-11,7	3,5	
4b Kísérleti termofil rothasztó felső	7,60	55	328	9,65E+04	8,31	-600	168	-432	-0,43	-13,3	1,9	

5.1. táblázat: Az elvégzett és átvett mérések

A (4-1) képletben a biofilmen belüli „klímaviszonyokat” méri a Ne-tényező, amely negatív értéket is felvehet. A köbgyökvonás emiatt értelmezésre szorul. A három gyök között komplex gyököket is találunk. Fizikai értelmet azonban csak a pozitív reális résszel rendelkező gyököknek tulajdonítunk, hisz a tápanyaglebontás csak pozitív lehet. A negatív számokból vont gyök függvénygrafikonjának értékei ezért csak feleakkorák lesznek, ahogy azt a Vincent-diagramhoz pozícionált 4-1. ábra szemlélteti.

A Ne-tényező értéke északnyugati irányban pozitív, délkeleti felé negatív.

5. A mérési eredmények ábrázolása

Az értelmezési és matematikai előkészítések után a mérési eredmények megjelenítésén a sor. A mérési pontokat működő biológiai reaktorterek adták (lásd 5-1. táblázat). A biológiai reaktortér egyben azt a baktériumközösséget is azonosítja, amely ott megtalálható.

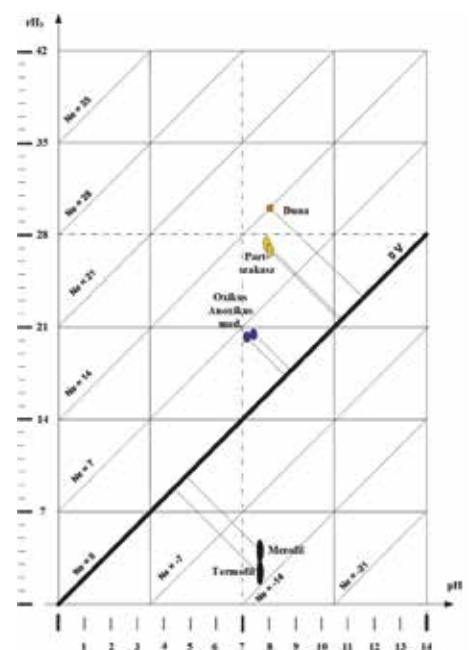
Az eseteket illetően a Duna vízteste az öntisztuló folyót jeleníti meg (1). A Csepel- és Szentendrei-szigeti partszakaszok a partszűrést reprezentálják (2a, 2b). A soproni oxikus és anoxikus medencékben elvégzett mérések az elevevéniszapos medencékben uralkodó viszonyokat mutatják (3a, 3b). A FCSM⁶ kísérleti mezofil és termofil rothasztóinak adatai megjelent cikkekben kerültek átvételre (4a, 4b) [2], [3], [4].

Az 5-1. táblázat pH, t és ORP oszlopai mérési értékek, F és R fizikai állandók, a többi oszlopban számított értékeket találunk.

A számítások közül csak a redoxpotenciál átszámítása kíván magyarázatot. A redoxpotenciált mérő műszer (ORP) a redoxrendszer (esetünkben a reaktortér) és a szonda közötti feszültséget méri. Az Ne- és rH_2 -változók kiszámításához azonban az E_h értékére van szükség. A korrekció mértéke a hőmérséklet függvénye [7].

$korr(t) = 223,9 - 1,01 t$, miáltal az átszámítási képlet $E_h = ORP + korr(t)$ lesz.

A Ne-tényezőt végül a (3-2), rH_2 -t a (3-3)



5.2. ábra: Az elvégzett mérések

képlet alapján lehet kiszámítani. Az 5-1. táblázat alapján a különböző reaktorterek viszonyait ábrázolhatjuk is (lásd 5-2. ábra).

Az ábra alapján vállalkozhatunk néhány általánosítás kimondására:

- A partszűrés, az elevevéniszapos szennyvíztisztítás, valamint a szennyvíziszap rothasztása az $rH_2 < 28$ tartományban zajlik.
- A folyókban (esetünkben a Dunában) történő öntisztulás aerob körülmények közepette megy végbe ($rH_2 > 28$). Itt mérhető a legnagyobb tápanyaglebontási intenzitás, azaz a Ne-tényező és a belőle vont köbgyökérték e helyütt a legnagyobb.
- A különböző reaktorterekben uralkodó pH-érték alig változik, ugyanakkor az rH_2 -számértékek szignifikánsan eltérnek egymástól. Megköszönhető a kijelentés, miszerint az eddig csak ritkán mért dimenziótlan rH_2 szerepe a

bakteriális különbségek megítélésében sokkal jelentősebb, mint hisszük.

- A szennyvíziszap-rothasztás szigorúan levegőtől elzárta, anoxikus körülmények között, $N_e < 0$ mellett zajlik, amit az 5-1. táblázatban a 4a és 4b sorok jelölnek. A mérések azt mutatják, hogy a termofil rothasztás hatékonysága határozottan nagyobb, mint a mezofil rothasztásé. Az 5-2. ábrán a $N_{e, \text{termofil}}$ metszék nagyobb, mint $N_{e, \text{mezofil}}$ távolság. Az üzemeltetői tapasztalatok ezt maximálisan alátámasztják.

A köbgyökvonás miatt a lebontás mértéke azonban csak fele az oxikus, $N_e > 0$ esetekhez képest. A rothasztásnál tapasztalt cca. dupla hosszúságú baktériumszaporodási időhossz éppen ezt támasztja alá [2].

- A (4-1) képlet szerint $N_e = 0$ -nál a tápanyaglebontás mértéke 0, amelynek közvetlen kísérleti bizonyítéka egyelőre nem ismert. A mindkét oldali függvénygrafikon meredeksége $N_e = 0$ -ban ∞ . Az „átmeneti” tartomány rendkívül

mazkodó anyagcseréje áll, amelyben „hidrogendonorként és hidrogénakceptorként” változatos párokat használhatnak. Vagyis ugyanannak a szervesanyag-molekulának a bontása során akceptorként oxigén, majd nitrát, akár szulfát stb. is szerepelhet, mielőtt fermentálni kezdene.

- Az oxikus és anoxikus eleveniszapos medencék „klímája” alig tér el egymástól. Az 5-1. táblázat 3a és 3b eseteihez tartozó pontok szinte fedésben vannak. Eszerint a nitrifikáló és denitrifikáló baktériumok ugyanazt a klímát kedvelik. Ez valószínűleg nem így van. Egy ilyen komplex rendszerben az rH_2 -t nem pusztán az oxigén jelenléte határozza meg, hanem egy sor más ion, elem oxidált meg redukált spéciéseinek az aránya is. Az oxigén csupán egy tényező ebben a folyamatban.

A denitrifikáció hatékonyságának növelésére a nem levegőztetett reaktorterek lefedését javasolja a [9]-ban kifejtett megoldás. Az úszó fedlapok a levegő beoldódását hivatottak

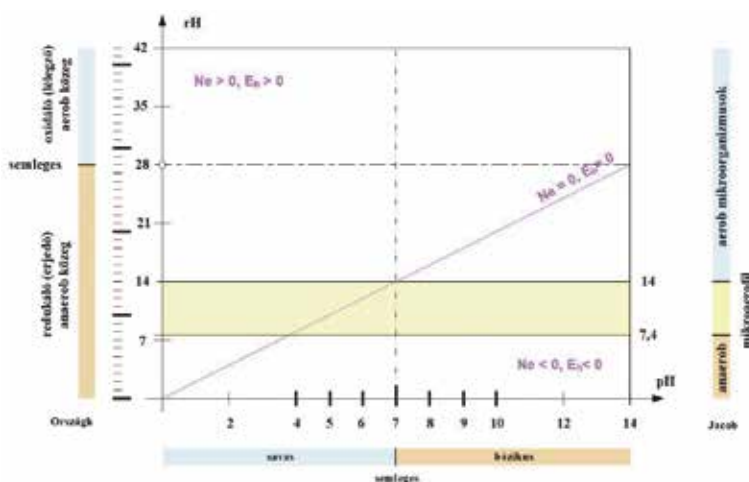
dása a partszakasz oxikus tulajdonságainak elromlásával hozható összefüggésbe. Ez például azzal magyarázható, hogy az oxigénelektrodhoz a vaselektrod áll a legközelebb, vagyis ha csak kicsit csökken a hozzáférhető oxigén mennyisége, akkor a vas(III) máris elkezd redukálódni vas(II)-vé.

Az oxigén hiányát többek között a medertérbe nyúló, a hajózást jobbító sarkantyú alatti holttér ugyanúgy okozhatja, mint a tisztítatlanul a folyóba engedett szennyvíz. A mérések a BKSZTT[®] üzembe helyezése után történtek, amikor már tisztítatlan szennyvíz nem ömlött a Dunába. Nem kényszerítve a folyót erőteljes öntisztulásra, miáltal a part menti víztest ma már nem válik oxigénszegénnyé. Ezért nem észlelünk különbséget a partszakaszok között, és ezért vált (váltak) feleslegessé a csepeli és ráckevei ivóvízkezelő művek üzeme. A BKSZTT üzembe lépése után a korábbi állapot – a Dunába Budapestnél nagy mennyiségben ömlő szennyvíz esete – egy elvégzendő mérésorozat elvégzése kedvéért már nem „visszaállítható”, de sarkantyúk alatti holtterek léteznek még. Az oxigénellátásban ép, illetve az oxigénellátásban sérült partszakaszok összevetésére van még mód. Ha a különbséget a mérések igazolják, az újabb bizonyíték volna a Vincent-diagram használhatósága mellett.

6. Miért kell a mikrobiológiai labormintákat hűtve szállítani?

Idézzük egy tapasztalt laborvezető meglátását a kérdésről: „A mikrobiológiai vizsgálatok esetén a baktériumszám, illetve a telepszám meghatározását végezzük. Ezeknek a szervezeteknek a szaporodása az áramló vízben (vezeték) más, mint álló vízben (mintatároló edény). A mintavétel célja a vezetékben élő szervezetek pillanatnyi mennyiségének megismerése. A mintavétel és a mintafeldolgozás közötti idő és a mintatárolási („tenyésztési”) hőmérséklet határozza meg a szervezetek szaporodását, végül is a mennyiségét. Amikor levesszük az áramló vízből a mintát, és lehűtjük annak hőmérsékletét, a szervezetek szaporodását blokkoljuk. Ha ezt nem tennénk, a mintánk vizsgálati eredménye nem a helyszíni vízminőséget jelezné. Erre vonatkozóan számos eredményünk van: a telepszám változása a tárolási idő és a tárolási hőmérséklet függvényében.” Vajon igaz-e ez a vélekedés, vagy kiegészítésre szorul?

Tekintsük a N_e -tényező (3-2) képletét, amelynek nevezőjében szerepel az abszolút hőmérséklet. Amikor lehűtjük a mintát, tulajdonképpen a N_e -tényezőt növeljük. Nagyobb Nernst-tényező nagyobb „életkedvet” jelent. A mintában nincs rendezett áramlás, nincs konvektív tápanyagszállítás sem, és jószerivel a mintában kellő mennyiségű szubsztrát sincs. A mikrobák ilyen



5 3. ábra: A Jacob-osztályozás

keskeny, létezése esetleg magyarázható Jacob⁷ megfigyelésével. Jacob az rH_2 -értékek mentén osztályozta a baktériumokat. Három csoportot definiált rH_2 mentén, az anaerob és aerob mikroorganizmusok között a mikroaerofil mikrobák találhatók. Az 5-3. ábra ezeket a tartományokat mutatja.

A Jacob-osztályozás és a N_e -tényező mentén történő elválasztás a $7 < pH < 8$ szűk sávjában ugyan fedésbe nem hozhatók egymással, de a jelleg hasonló. Az átmenet nem pontosan ugyanott van. A baktériumok O_2 -hez fűződő jellemzésénél némi ellentmondás is felfedezhető: az rH_2 semleges pontja 28-nál van. Ezen logika mentén az aerob mikroorganizmusok csak az $rH_2 > 28$ tartományban vannak. Jacobnál az aerob tartomány már $rH_2 > 14$ -nél kezdődik. Ennek hátterében egy-egy baktérium nagyon alkal-

megakadályozni. Ez a lépés fogalmainkkal a reaktortér klimatikus viszonyainak megváltoztatását szolgálja, a reaktortér P_e -számmal jellemezhető tápanyagellátási körülményeit nem érinti. A biológiai szűrőelmélet szerint a víztér lefedésének akkor van értelme és haszna, ha hatására a N_e -tényező megnő. Érdemes volna ezt a sejtést mérésekkel igazolni vagy elvetni.

- Az 5-2. ábra nem mutat lényeges különbséget a Szentendrei- és Csepel-szigeti partszakaszok tekintetében. A 2a és 2b esetekhez tartozó pontok szinte átfedik egymást. Korábban – a mérések lefolytatása előtt – a Szentendrei- és Csepel-szigeti partszűrős között lényeges különbség állt fenn. A csepeli partszakaszon kiemelt kútvizet kezelni kellett. A partszakaszok különbségét kutató tanulmány [11] szerint a kútvíz vas-mangán tartalmának felszaporó-

körülmények mellett „éhen halnának”. Növekedésüket, szaporodásukat az előnyösebb „klimatikus” viszonyokkal tartjuk fenn. Eszerint a hűtés inkább életben tartást jelent, semmint blokkolást. Életben akarjuk őket tartani, hogy a laborban kimutathassuk őket. A laborban a Petri-csészében táptalaj van, amelyet a mintával „megfertőzünk”. A táptalajnak olyan összetevői „mintázata” kell legyen, mint a kimutatni kívánt mikrobák enzimmintázata. A Petri-csészében sincs áramlás, ezért a tenyésztés 22 °C és 37 °C hőmérsékleteken zajlik. (Nagyobb hőmérséklet mellett a diffúziós tényező nagyobb lesz.) Az így gerjesztett diffúzióval a táptalaj molekulái a mikrobákhoz jutnak. Megtörténik a szubsztrátmolekulák lebontása, és a felszabadult energia felhasználásával a mikrobák szaporodásnak indulnak. A tenyésztet láthatóvá válik, a mérés eredménye a telepszám lesz. Ha nincsenek a táptalajhoz „illő” mikrobák a mintában, úgy a szaporodásuk sem indul meg, és a mikrobiológiai mérés eredménye negatív – üzemeltetői szemszögből jó (!) – lesz.

7. A biológiai folyamatok irányítása

A biológiai úton történő víztisztítás vagy a szennyvíziszap rothasztással történő stabilizálása azonos módon, de más feltételek mellett zajlik. Működtetésüktől azt várjuk, hogy stabilan kézen tarthatók legyenek, hogy hatékonyságuk a lehető legjobb legyen. Az irányítástechnikai megvalósításhoz paraméterek mérésére van szükség. Mit mérünk? A kérdés korrekt megválaszolásához előbb taglalni érdemes néhány, akár triviálisnak is nevezhető körülményt. Méréstechnikai szempontból a vízminőségmérések nem tartoznak az egyszerű mérések közé. Három, jól elkülönülő csoport létezik:

- A vízminőségi paraméterek egy csoportja szondás mérés. Ezeket a távadás méréseket a SCADA-rendszer fogadni tudja. A mérési érzékelők közvetlenül a reaktorterekben kerülnek felszerelésre. Ebbe a kategóriába többek között a pH, ORP, hőmérséklet, oldottóxigén-vezető képesség, zavarosság, maradéklór-mérések tartoznak.
- A második csoportot a vízminőség-analizátorok adják, amelyek szintén távadás mérések. Szaktudást, folyamatos törődést igénylő mérőeszközök ezek. Közös jellemzőjük az automata mintavétel és a reagensek használatának szükségessége (hacsak nem nagyon különleges szelektív elektrodákat alkalmazunk). A mérőeszközök bonyolultsága következtében a mérések csak időszakosan valósulhatnak meg. Analizátorok mérik a javarészt koncentráció típusú mennyiségeket, mint PO_4^{3-} , NH_4^+ -N, NO_3^- -N, (TOC).

- A laborméréseket a folyamatirányító rendszerek közvetlenül nem fogadják, azaz nem távadás mérések. A mérések elvégzéséhez mintavételre van szükség. Általában csak laborban mérhető mennyiségek: KOI, BOI, TOC, különféle koncentrációk, összetételek, iszapok fűtőértéke, biofilmhordozó anyagok fajlagos felülete, diffúziós tényezők, mikrobiológiai mérések, mikroszkopikus vizsgálatok stb.

Szennyvíztelepek műszerezettségét vizsgálva arra a következtetésre lehet jutni, hogy inkább a biokémiai folyamatok eredményét, az output mennyiségeket, a létrejött vegyületek koncentrációját mérjük. Kevesebb figyelem jut a mikrobióta-tápanyagellátásra és a reaktorterek „klimatikus” viszonyainak elemzésére.

Az output mennyiségek okozatok (következmények), és többnyire lassú analizátorok által mértek. Szabályozástechnikai szempontból ezeknek a mennyiségeknek az átmeneti függvénye késleltetéssel, esetleg holtidővel rendelkezik, így szabályozási célra nehezebben használható. A baktériumok tápanyagellátását és „munkakörülményeit” mérő mennyiségek ezzel szemben késleltetéssel nem rendelkező okok, amelyek gyors szondák által mértek. Mindezek előrebecsítésével megfogalmazandó a biológiai reaktorterek üzemét figyelő irányítástechnikai rendszer alapkövetelménye. A diszpécser által figyelt monitorokon lennie kell olyan képnek, ami a tápanyagellátás logisztikai viszonyait mutatja, azaz követni kell tudni a Pe-szám változását. Ugyanígy láttatni kell tudni a baktériumok „munkakörülményeit” a Vincent-diagramon. Ez utóbbihoz a reaktorterek pH-, hőmérséklet- és redoxpotenciál-mérésére feltétlenül szükség van, amelyek szondás mérések. Ezek az elméleti megfontolásokon nyugvó feldolgozások ma még hiányoznak a SCADA-rendszerek képernyőin.

8. Összefoglalás

Pasteur 1854-ben a lille-i egyetemen a székfoglaló beszédében a következőket mondta: „Elmélet nélkül a gyakorlat csak a szokás ereje által irányított rutinmunka. Csak az elmélet képes felnevelni és fejleszteni a feltalálás szellemét” [1]. Hasonló gondolatra jut az FCSM alkotógárdája is: „...vonnakozó jelenlegi ismereteink zömmel csak empirikus jellegűek, amelyek nem képesek kellően megmagyarázni a jelenségeket” [2]. A közvetlenül kimondott és a burkoltan hiányolt igény egyaránt azt mondja, hogy elméleti megfontolásokra, modell építésére van szükség. Az axiomatikusan megalapozott biológiai szűrőelmélet ilyen modell, amely a partiszűrést, a szennyvíztisztítást és a rothasztást azonos nézőpontból szemléli. Azt is mondja, hogy a fertőtlenítés és a víztisztítás a biológiai élet korlátozásának, illetve ösztönzésének

szándékában mutat csak különbözőséget, miközben az alapjelenség, a mikrobák viselkedése nagyjában azonos. A biológiai ivóvíztisztítás és a szennyvíztisztítás ma egymástól elválasztottan kezelt tudományágak. Külön is oktatják őket. Jelen cikk egyértelműen rávilágít arra, hogy csak közös tárgyalásmód lehet eredményes. Egy elmélet csak akkor lehet helyes, ha a felvetődő kérdések mindegyikére választ képest adni, legyen az a folyóvíz biológiai öntisztulása vagy a vízminőségi minták hűtési igényének problémaköre. Biológiai reaktorterek üzemének ellenőrzéséhez is csak akkor találunk általánosan használható választ, ha azt elméleti megfontolások mentén is keressük. Köszönet illeti a fővárosi és soproni vízműves kollégákat, akik a mérések elvégzésében segítségemre voltak.

9. Hivatkozások

- [1] Leshevalier, H.A. – Solotorovsky, M.: *A mikrobiológia három évszázada*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1971.
- [2] Oláh, J. – Borbélyné J. J. – Palkó, Gy.: *Az anaerob rothasztók üzemének ellenőrzése*. statex.hu/cikkek.
- [3] Oláh, J. – Öllös, G. – Palkó, Gy. – Rása, G. – Tarjányné Sz. Sz.: *Anaerob lebontás alap-folyamata és a rothasztók ellenőrzése I.* statex.hu/cikkek.
- [4] Oláh, J. – Öllös, G. – Palkó, Gy. – Rása, G. – Tarjányné Sz. Sz.: *Anaerob lebontás alap-folyamata és a rothasztók ellenőrzése II.* statex.hu/cikkek.
- [5] Feynman, R. P. – Leighton, R. B. – Sands, M.: *Mai Fizika 1. A modern természettudomány alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [6] Bynum, W.: *A tudomány rövid története*. Kossuth Kiadó, Budapest, 2013.
- [7] Országh, J.: *A bioelektronika tudományos bírálat*. <http://www.eautarcie.com>
- [8] Reichart, O.: *Az rH fogalmának, értelmének levezetése*. Kézirat, 2009.
- [9] Berecz, V. – Bakos, V. – Jobbágy, A.: *Úszó fedlapok hatásának vizsgálata nem levegőztetett eleveniszapos medencék működésére*. Dulovics Dezső Junior Szimpózium, 2018.
- [10] Tolnai, B.: *Vízminőség biológiai úton*. Kézirat, 2010.
- [11] Tolnai, B.: *A biológiai szűrősről – axiomatikus szemléletben*. *Hidrológiai Közöny* 2015/3

-
- 1 John Snow (1813–1858) angol orvos, epidemiológus, anesztetikus
 - 2 Louis Pasteur (1822–1895) francia kémikus és mikrobiológus
 - 3 Louis-Claude Vincent (1906–1988) francia vízkutató mérnök, a bioelektronika atyja
 - 4 Leonor Michaelis (1875–1949) német biokémikus; Maud Menten (1879–1960) kanadai kutató orvosnő
 - 5 Jacques Monod (1910–1976) francia mikrobiológus és genetikus, orvostudományi Nobel-díjas (1965)
 - 6 Fővárosi Csatornázási Művek
 - 7 Francois Jacob (1920–2013) francia biokémikus, genetikus, orvostudományi Nobel-díjas (1965)