

A KAVITRON SZEREPE A SZENNYVÍZTISZTÍTÓ TELEPEKEN

Tolnai Béla
BioModel Bt.

KIVONAT

A szennyvíztisztítás és az iszapkezelés bizonyos olvasatban fizikai, felület-fizikai elvekre vezethető vissza. Felület kell a baktériumok letelepedéséhez, ahogy az iszap adszorpciós megkötésénél is a felület nagysága számít. A kavitron olyan áramlástechnikai gép, amely a felület létrehozásában, illetve a felületek találkoztatásánál játszik szerepet. A szennyvíznek, szennyvíziszapnak a kavitációs zónán történő többszöri áthaladásával tápanyag lebontási hatékonyságjavulás érhető el. A kavitron szennyvíztelepi alkalmazása új lehetőségekre világít rá.

KULCSSZAVAK: kavitron, iszapstabilizálás, biogázkihozatal, hatékonyságjavítás

1 BEVEZETÉS

A kavitron története az 1960-as, 1970-s évekig nyúlik vissza.

Még az 1970-es években Tatabányán Vadász József vegyészmérnök kertjében növények termesztésével kísérletezett. A szivattyúja kavitált és a vízzel öntözött növények egészségesebbek voltak, mint a kontroll-parcella növényei. Megkereste fivérémet, Fáy Csabát, aki nekem átpasszolta a munkát: tervezzünk egy erősen kavitáló gépet mezőgazdasági célra. Én el is készítettem a terveit. Álló vízbe nagy sebességgel forgó rudak nyúltak bele, és álló lapok akadályozták, hogy a víz forogjon. Egy tatabányai cég vállalkozott a gyártásra. Ekkor azonban a munka hirtelen leállt. Kiderült, hogy Vadász József korábban tartott egy szakmai előadást a kavitáció hatásáról, és az élelmes tatabányaiak – Vadász Józsefet kihagyva - azonnal szabadalmaztatták az ötletet, nem csupán mezőgazdasági, hanem egyéb, például csírátlanítási, kémiai és bármilyen más célra. Az általam tervezett gép tudtommal sohasem került legyártásra. Az élelmes tatabányaiak terveztek valamit, amit kavitronnak neveztek el, és ezt próbálták eladni különféle célokra. Ezt én már nem követtem.¹

A Lignimix eljárást tulajdonképpen az az alapkutató alapozta meg, amit Barna János még az 1960-as évek elején folytatott le a Bányászati Kutató Intézetben, amikor is vizesközegben erőteljes ütközéses nyíró hatásnak tett ki barnaszénport, és ezáltal sikerült homogén szuszpenziót képeznie. Az eljárást szénepeptizálásnak nevezte el. Miután kiderült, hogy ez a módszer széndúsításhoz nem használható, az eljárást szellemi termékkénti értékesítésre felajánlották a NOVEX Találmányfejlesztő és Értékesítő Külkereskedelmi Rt-nek, ahol témafelelősként kerültem a témával kapcsolatba még 1974-ben (működő referencia hiányában a találmánykénti külföldi értékesítés próbálkozásai nem hoztak sikert). Az iparilag is hatékony aprítást és homogenizálást igazából a Kavitron nedvesőrle berendezés megjelenése tette lehetővé: ezt Nemes Sándor, a Tatabányai Szénbányák központi műhelyüzemének főmérnöke szerkesztette meg és kivitelezte, elsősorban műtrágya bekeveréséhez, majd megszervezte a sorozatgyártást is, az ott licenben gyártott Warman bányaszivattyúkra adapterként történt alkalmazással. Időközben az eljárás megkapta a magyar szabadalmat és megtörtént a PCT (Patent Cooperation Treaty) szerinti európai szabadalmi bejelentés is: ott jelenleg „patent pending” fázisban van az eljárás² (Stadler, 2013).

A Tatabányai Szénbányák felszámolásával a Weir Minerals Limited, UK (előző neve Warman International Limited) visszavette a Warman gyártási licencet 1993-ban. Ezért a kavitron berendezést egyedi gyártásban a Weir Minerals Limited, UK lehet megrendelni. A magyar ötlet a Warman kopásálló zagyszivattyúba lett beintegrálva, ahol a szivattyú áramlástechnikai kialakítása és a kopásálló anyagminőség segítségével képes ellenállni a kavitációs hatásoknak.³

1.1 A kavitron gépegység

Áramlástechnikai gépek osztályozását szokás az alkalmazási területek alapján megtenni.

¹ Dr. Fáy Árpád visszaemlékezése

² Stadler János kavitron eredetkutatása

³ Puskás Ferenc (WEIR Minerals) kiegészítése

1. táblázat. Áramlástechnikai gépek szerepe

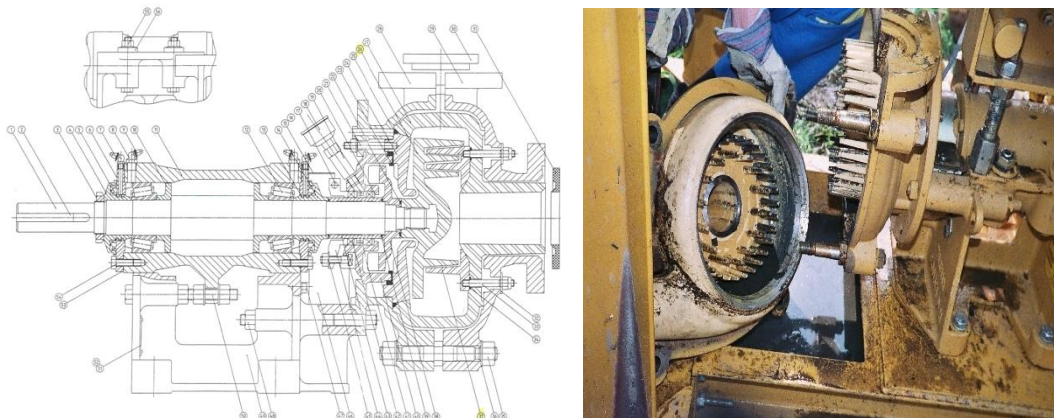
	átalakítása	továbbítása
anyag	+ (kavitron)	+++ (szivattyúk, fúvók, ventilátorok)
energia	+++ (víz-, gőz, gázturbinák, szélkerekek)	+ (hidr. tengelykapcsoló)

Az *anyag továbbítására* (pl. szivattyúk) és az *energia átalakítására* (pl. turbinák) megalkotott gépek a legtipikusabbak és egyben a leggyakoribbak is. Az *energia továbbítása* (pl. hidraulikai tengelykapcsoló) már ritkábban jelentkező alkalmazási terület, az *anyag átalakításra* szolgáló áramlástechnikai gépek pedig egyenesen ritkaságszámba mennek.

Kavitációnak azt a jelenséget nevezzük, amikor a nyomás a gépben a telített gőznyomás alá süllyed, a vízben gőzbuborékok jelennek meg, amelyek az áramvonalon tovább haladva újra nagyobb nyomású térbe jutva hirtelen összeroppannak. A buborékok összeroppanásának roncsoló hatása van, amely egy idő után tönkreteszti a járókereket és a gépet magát. A gép szerkezetének kialakításával, kedvező üzemi körülmények biztosításával (ráfolyásos üzem) van lehetőségünk a kavitációt elkerülni

A **kavitron** ezzel szemben olyan gép, amelyben szándékoltan hozunk létre kavitációt, annak érdekében, hogy a szállított folyadék - esetünkben a szennyvíz – kényyszerűen kavitációs zónán haladjon át. A roncsoló hatást az iszapleheken, mikrobiális élőlényeken, a szennyezést okozó oldott óriás-molekulákon várjuk kifejlődni. A kavitron elsődleges feladata tehát az anyag átalakítása.

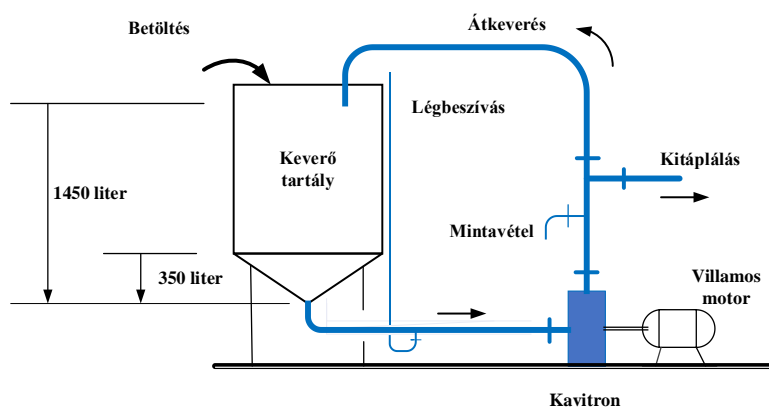
Az *1. ábra* a kavitront mutatja. A gép felépítésében egy szivattyúra hasonlít, járókereke azonban különleges. Két egymásba nyúló tuskés félből áll, ahol az egyik tuskesor áll. Az álló és forgó tuskék közötti tér az anyagátalakítás színtere. Itt történik a nedvesörlés és itt alakul ki a roncsolást előidéző kavitáció.



1. ábra. A kavitron metszeti ábrája és szétszedett állapotban

1.2 A kavitron kísérleti berendezés

A kavitront nem önállóan használjuk, többnyire egy komplett berendezés rész. A *2. ábrán* vázolt felépítés fő elemei a keverőtartály és a kavitron, amely csővezetékkel összekötve alkot egységes berendezés együttest.



2. ábra. A berendezés rajza és fotója

A kezelendő anyagot (vagy anyagokat) a keverő tartályba töltjük. A kezelés többszöri átforgatással valósul meg. A kezelés utáni kitáplálás jelenti az átlépést a következő technológiai fázisba. A konkrét eseteket lásd később.

A berendezésben a kavitronnak négy feladata van:

- **homogenizálás, keverés:** keverék előállítás - esetünkben szén-/zeolitpor és iszap öszekeverése. Lásd később.
- **anyag továbbítás:** a kavitron egyben szivattyú is, hatásfoka azonban nem a legjobb.
- **anyagátalakítás:** a gépben szándékolatlan létrehozott kavitációs zónában roncsolási hatás kifejtése.

Roncsolni baktériumokat lehet, amely egyfajta fertőtlenítésnek is felfogható. Roncsolni az iszap szárazanyag tartalmát lehet, amellyel a fajlagos felület növelése érhető el.

Roncsolni nagy molekulákat lehet, amely a szennyező molekula diffúziós tényezőjének növekedését hozza.

Más szavakkal a kavitron a biokémiai reakciók felgyorsítását szolgáló dezintegrációs eszköz, áramlástechnikai elven működő gép.

- **Oxigén beoldódás elősegítése:** az oxigént később az oxikus biokémiai reakciók használják el. A fúvók teljesítményigénye lesz ezáltal csökkenthető. Az 2 ábra kísérleti berendezésén a „Légbeszívás”-sal jelölt állócső szolgál erre a feladatra.

2 KÍSÉRLETEK A BERENDEZÉS SEGÍTSÉGÉVEL

A következőkben a Siófoki szennyvíztelepen megvalósult innovációs kísérletekről lesz szó, amelyben nemcsak a kavitron alkalmazhatóságát mutatjuk meg, hanem a hatékonyság mértékét is kiszámoljuk.

2.1 A kísérletek célja

A kísérleteket a félüzemi berendezésen hajtottuk végre. Elsősorban arra voltunk kíváncsiak, hogy a feladatként megjelölt hatások valóban létrejönnek-e, lehetőleg számszerűsítve elsősorban az anyagátalakítással kapcsolatos előzetes meglátásokat.

A mérési terv összeállítása a következő kérdések megválaszolhatósága érdekében történt.

- A kavitációs zónán történő többszöri áthaladás milyen elváltozásokat okoz a különböző minőségű iszapok és az adalékanyagok esetében?
- Ha a szennyvíziszapot adalékanyag hozzákeverésével stabilizáljuk, minimálisan mennyi adalékanyagra van szükségünk?
- Meddig érdemes az átforgatások számát növelni?

2.2 A mérési terv

2 táblázat Mérési igények a kavitációs hatás kimutatásához

Médium	Kísérleti lépések	Mintavételes mérések	In situ mérések	
1	350 l mechanikailag előtisztított szv.	csíraszám fajlagos felület szárazanyag tartalom lézerdiffrakciós szemcseeloszlás	pH redoxpotenciál (ORP) hőmérséklet (t) oldott O ₂	
				0 perc szennyvíz
				4 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				8 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				16 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
24 perc kavitációs zónán történő átvezetés után				
2	350 l kevert iszap sűrítés előtti állapot.	csíraszám fajlagos felület szárazanyag tartalom lézerdiffrakciós szemcseeloszlás	pH redoxpotenciál (ORP) hőmérséklet (t) oldott O ₂	
				0 perc kevert iszap
				4 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				8 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				16 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
24 perc kavitációs zónán történő átvezetés után				
3	350 l víz + zeolit adagoló	fajlagos felület szárazanyag tartalom		
				0 perc szén
				4 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				8 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				16 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
24 perc kavitációs zónán történő átvezetés után				
4	350 l víz + zeolit adagoló	fajlagos felület szárazanyag tartalom		
				0 perc zeolit
				4 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				8 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				16 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
24 perc kavitációs zónán történő átvezetés után				
5	350 l rothasztott iszap vítelenítés előtti állapot	csíraszám fajlagos felület szárazanyag tartalom lézerdiffrakciós szemcseeloszlás	pH redoxpotenciál (ORP) hőmérséklet (t) oldott O ₂	
				0 perc rothasztott iszap
				4 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				8 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
				16 perc kavitációs zónán történő átvezetés után
24 perc kavitációs zónán történő átvezetés után				

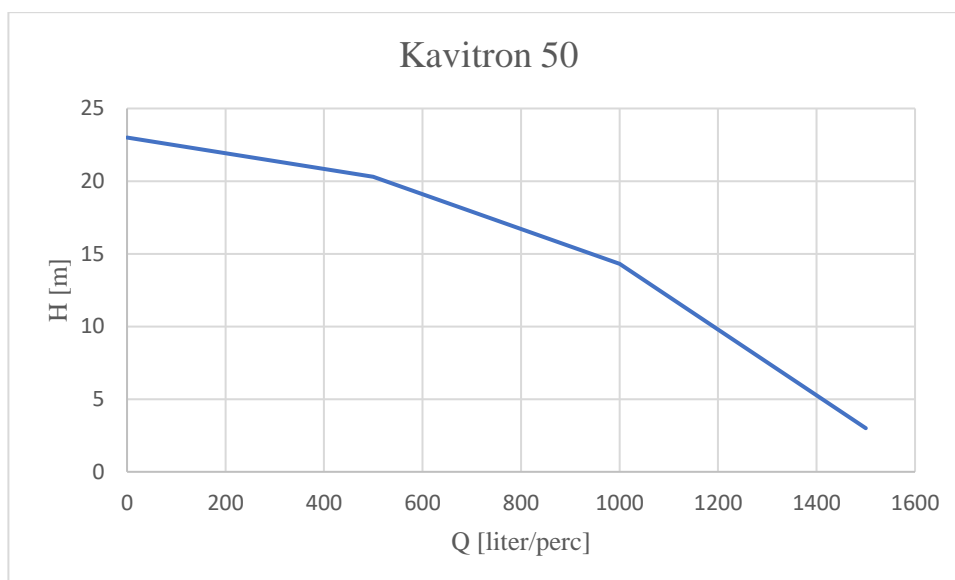
A mérések két csoportra oszthatók.

- A mintavételes mérések – csíraszám/telepszám, fajlagos felület, szárazanyag tartalom, és lézerdiffrakciós szemcseméret eloszlás – a kavitációs hatás bizonyítását és a keverékek előállításánál az adalékanyag mennyiségének meghatározását szolgálják.
- A kavitrion történetében megemlítésre került a kavitáció kedvező hatása a növények fejlődésében. Az in situ mérésektől – pH, ORP, t, oldott O₂ – azt várjuk, hogy ezeknek a hatásoknak az okára magyarázatot kapjunk.

A mérési igényeket a 2. táblázatban foglaltuk össze.

A 2. táblázat öt kísérlet mutat. A kísérleteket 3 iszapminőséggel (szennyvíz, kevert iszap, rothasztott iszap) és a két adalékanyag (szén és zeolit) szuszpenziójával hajtottuk végre.

A kísérlet 350 liter médium betöltésével kezdődik. Mindegyik kísérletnél tulajdonképpen a kavitációs zónán történő áthaladás hatását vizsgáljuk. A korábbi tapasztalatok alapján előre meghatározott időpontokban mintát veszünk, illetve az in situ mérések esetén azonnal mérünk. Az időpontok a kavitációs zónán történő áthaladások számának, azaz a kezelés gyakoriságának felelnek meg. A kavitrion „szivattyús” jelleggörbéje segítségével (lásd 3. ábra) konkrét számításokat is végezhetünk.



3. ábra. A kavitrion jelleggörbéje

A berendezés szállítómagassága $H \sim 5$ m, a térfogatáram $Q \sim 1400$ liter/perc, a $V = 350$ liter mennyiség egyszeri átforgatásához így 0,25 perc szükséges. A 24 perc, maximális időtartam alatt 96 átforgatás történik meg.

A kavitációs roncsolóhatás létrejöttét a csíraszám (vagy telepszám) csökkenésétől, a fajlagos felület növekedésétől várjuk. A lézerdiffrakciós szemcseméret mérés eredménye egy részecske összetételi spektrum. Ha a kezelés utáni kép a kisebb részecskék irányába tolódik, úgy a kavitációs roncsolás bekövetkezik.

Az iszapok közül a termék előállításra szánt kevert iszap és az adalékanyagok felületének azonoságának feltételezéséből számítjuk ki az adagolandó anyag mennyiségét.

Az adagolandó adalékanyag mennyiség és az átforgatások számának meghatározása a kezelés, illetve a keverés gazdaságossága miatt érdekes.

3 A KAVITRON BERENDEZÉS ALKALMAZÁSA

3.1 Az iszap stabilizálása keverék előállításával

Keverékek előállításához szokásosan egy tartályra van szükség, amelybe betöltjük az összekeverendő anyagokat, majd egy a keverőtérbe lógó szárnylapát segítségével összekeverjük azokat.

A kavitronnal történő keverés némiképp másként történik, hatását tekintve intenzívebb. A kavitációs zónán való többszöri áthaladás során egyfajta nedves őrlés is bekövetkezik, amely mind iszapot, mind az adalékanyagot érinti. A 2. ábrán szereplő félüzemi kísérleti berendezés erre alkalmas.

A kísérletek során külön-külön meghatároztuk az iszap és víz, valamint az adalékanyag és víz szuszpenziókban a szárazanyagtartalmak fajlagos felületének nagyságát. Az átkeverés az iszap és adalékanyag részecskék találkoztatását is jelenti, melynek során adszorpciós megkötés jön létre. Végül is ez a hatás eredményezi az iszap stabilizálódását.

A kulcskérdés keverékek előállításában az, hogy mennyi adalékanyagra van szükség és mennyi ideig történjen a keverés.

Tapétázáskor annyi tapéta tekercset kell vevünk, amelynek felülete lefedni képes a falfelületet. Hasonlóképpen annyi adalékanyagra van szükség, amely a teljes iszapmennyiség megkötését lehetővé teszi. Mindkét esetben a felületazonosság a megoldás kulcsa.

A keverőtartályba V [m³] térfogat kevert iszapot töltünk, majd ehhez m [kg] tömegű adalékanyagot keverünk. A kavitációs zónán való többszöri áthaladás során nemcsak elkeverés történik meg, hanem közben az őrlés és a kavitáció révén nő az anyagok fajlagos felülete és részben elpusztításra kerülnek az iszapban megtalálható mikróbák is.

Az a_{iszap} [m²/g] fajlagos felületű, $sz a_{iszap}$ [g/kg] szárazanyagtartalmú és ρ_{iszap} [kg/m³] sűrűségű iszap a V [m³] térfogatú tartályban

$$F_{iszap} = a_{iszap} * sz a_{iszap} * \rho_{iszap} * V \quad [m^2]$$

felületet képvisel. A bekeverendő adalékanyag felülete

$$F_{adalékanyag} = 1000 * m_{adalékanyag} * a_{adalékanyag} \quad [m^2]$$

ahol 1000 [g/kg} mértékegységváltó szorzó.

képlettel adható meg. Alapvetésünk szerint a két felület azonosságát követeljük meg.

$$F_{iszap} = F_{adalékanyag}$$

Ebből a feltételből kapjuk

$$m_{adalékanyag} = \frac{a_{iszap} * sz a_{iszap} * \rho_{iszap} * V}{1000 * a_{adalékanyag}} \quad [kg]$$

a szükséges adalékanyag tömegét. A képletekben a_{iszap} és $a_{adalékanyag}$ helyettesítési értékei a kavitációs kezelést követő értékek lesznek.

Mixet kevertiszapból készítünk. A kevertiszap szárazanyagtartalma és sűrűsége ismert mennyiségek. A kevert iszap fajlagos felületét az őrlőhatás következtében megnövekedett fajlagos felülettel azonosítjuk. Az adalékanyag estében ugyancsak a megnövekedett fajlagos felülettel számolunk (lásd 3. táblázat).

3. táblázat Mért fajlagos felületek és száraz anyag tartalmak

	Fajlagos felület	Szárazanyag	Sűrűség
	[m ² /g]	[g/kg]	[kg/m ³]
Kevert iszap a kavitációs kezelés után	25	25	1000
Szén a kavitációs kezelés után	12		
Zeolit a kavitációs kezelés után	25		

Ennek megfelelően az adagolandó mennyiségek:

$$m_{szén} = \frac{a_{iszap} * sza_{iszap} * \rho_{iszap} * V}{1000 * a_{szén}} = \frac{25 [m^2/g] * 25 [g/kg] * 1000 [kg/m^3] * 1,45 [m^3]}{1000 [g/kg] * 12 [m^2/g]} = 75,5 [kg]$$

$$m_{zeolit} = \frac{a_{iszap} * sza_{iszap} * \rho_{iszap} * V}{1000 * a_{zeolit}} = \frac{25 [m^2/g] * 25 [g/kg] * 1000 [kg/m^3] * 1,45 [m^3]}{1000 [g/kg] * 25 [m^2/g]} = 36,3 [kg]$$

Az a fajlagos felületértékek kimérése a kísérleti berendezés használatával történt.

A kapott eredmények alapján mondhatjuk, hogy a $V [m^3]$ térfogatban jelenlévő iszaptömeg

$$m_{iszap} = \rho_{iszap} * V = 1000 [kg/m^3] * 1,45 [m^3] = 1450 [kg]$$

megkötéséhez fajlagosan

$$\frac{m_{szén}}{m_{iszap}} = \frac{75,5 [kg]}{1450 [kg]} = 5 m\%$$

illetve

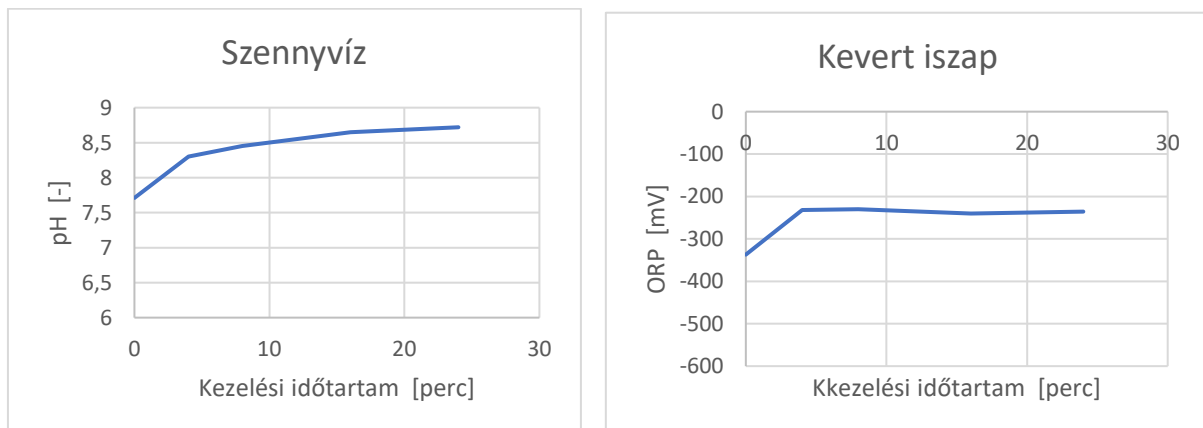
$$\frac{m_{zeolit}}{m_{iszap}} = \frac{36,3 [kg]}{1450 [kg]} = 2,5 m\%$$

adalékanyagra van szükség.

Összehasonlításként tekintünk a korábban végrehajtott Lignimix kísérleteket (Stadler, 2013).

A Lignimix előállításához 5 m/m% lignitet használtak. Az adagolás mértéke a Lignimix esetében tapasztalati úton került meghatározásra.

Megválaszolendő kérdés még a keverés időtartamának hossza. Ehhez tekintünk két tipikus mérési eredményt.

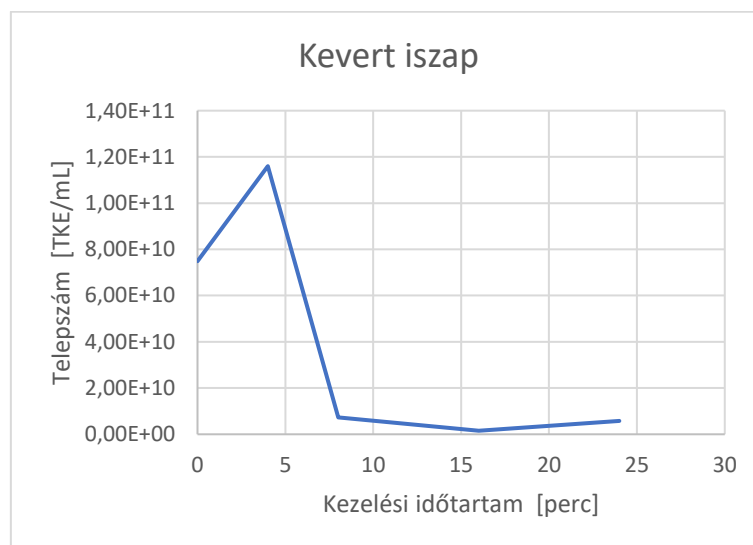


4. ábra. A kavitációs kezelés jellemző időbeli lefutása

Az időbeli lefolyások azt mutatják, hogy az első 4 perc után már lezajlanak az érdemi változások, némi rátartással 8 perc hosszúságú kavitációs kezelés elégségesnek látszik. Az átforgatások száma 8 perc után: $8 \text{ perc} / 0,25 \text{ perc} = 32$.

Keverék előállításakor teli tartállyal dolgozunk, $V=1450$ liter. A berendezés szállítómagassága ekkor $H \sim 2,5$ m, a térfogatáram, $Q \sim 1500$ liter/perc. A mennyiség egyszeri átforgatásához így ~ 1 perc szükséges. A roncsolási és keverési folyamat biztos bekövetkeztéhez 32 átforgatás kell, amely ~ 32 perc keverési időtartamot jelent.

A kavitáció a mikrobák sejtjeit is roncsolja, azaz fertőtleníti. Példaként tekintsük a telepszám változását a kevert iszapon. A roncsolóhatás következtében egy nagyságrend telepszám csökkenést mértünk (lásd 5. ábrát).



5. ábra. A kavitációs kezelés fertőtlenítő hatása

Az iszapból adalékanyag hozzáadásával előállított terméknek nemcsak stabilnak, hanem mikrobiológiailag megfelelőnek, a patogénektől mentesnek kell lennie. A kavitációs kezelés a sejtek elpusztításával segít ebben, a mikrobapusztító hatás azonban csak mérsékelt, ezért további mikrobamentesítésre is szükség lehet.

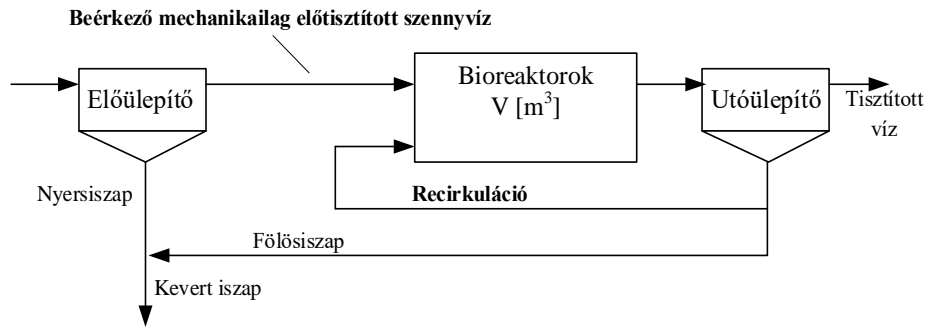
A kavitron berendezésről lekerülő mix nedvességtartalma még magas. Víztelenítés után az előálló termék stabil, a termőföldekre előírt feltételek mellett kihelyezhető.

3.2 Az eleveniszapos reaktor hatékonyságának növelése

A vízben lévő szennyezés eltávolítása, azaz a szubsztrát molekulák lebontása a Pe -számtól fordított arányban függ (Tolnai, 2015).

3.2.1 A recirkuláció szerepe

Az eleveniszapos medence esetében - elsősorban a konvektív sebesség erősen változó jellege miatt - a Pe -szám egzakt kiszámítása nehézkes. A Pe -szám változásának mértéke azonban jól követhető. Ehhez induljunk ki a 6. ábrán vázolt egyszerűsített sémából.



6. ábra. Az eleveniszapos szennyvíztisztítás

A számításokhoz használjuk egy valódi szennyvíztelep adatait 4. táblázat)

4. táblázat. Az anyaghányadok

Beérkező szennyvíz	Recirkuláció 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

Az anyagmérlegben résztvevő iszapminőségek jellemzőit az 5. táblázat mutatja.

5. táblázat. Iszapjellemzők

	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

Ha a reaktorteret csak beérkező szennyvízzel töltenénk meg ($r=1$), úgy az egyenértékű szemcseátmérő a 5. táblázat adatainak felhasználásával

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

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

Recirkuláció esetén a reaktortérben elkeverten kétfajta iszapminőség van jelen. Az egyenértékű szemcseátmérőt a (1) képlet logikája alapján ekkor a következőképpen számolhatjuk.

$$d_{e,recirk} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{7,5 * 1 * 1000 * 0,865 * V + 9,3 * 8,6 * 1000 * 0,135 * V} = \frac{6}{6488 + 10797} = \frac{6}{17285} = 3,45 * 10^{-5} \text{ m} \quad (2)$$

A számokból jól látható a recirkuláció erőteljes felületnövelő hatása.

Hogy az iszapvisszavezetés milyen módon befolyásolja a tápanyag lebontás hatékonyságát, ahhoz Pe -számok reciprokának arányát kell kiszámolni,

$$\frac{\Delta S_{recirk}}{\Delta S} \square \frac{1}{Pe} = \frac{Pe}{Pe_{recirk}} = \frac{d_e w}{D_s} = \frac{d_e}{d_{e,recirk}} = \frac{8 * 10^{-4}}{3,47 * 10^{-5}} = 2,3 \quad (3)$$

ahol

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

Mint az látható a recirkuláció alkalmazása a tápanyag lebontás hatékonyságot javítja, mégpedig erőteljesen. Számpéldánkban a kereken 2,3-szoros érték elsősorban az iszap besűrűsödéséből, a szárazanyag tartalom növekedéséből fakad.

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.

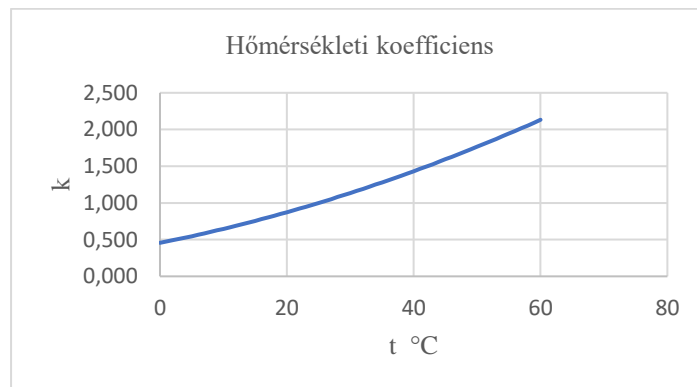
3.2.2 Hatékonyságromlás télen

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.

$$D_{S,nyáron} = k(t)_{t=22^\circ C} D_S|_{t=25^\circ C} \quad (4)$$

$$D_{S,télen} = k(t)_{t=10^\circ C} D_S|_{t=25^\circ C} \quad (5)$$

A hőmérsékleti koefficiens konkrét értékeket a 7. ábrából nyerjük.



forrás: www.erc.mantana.edu/biofilmbook

7. ábra A diffúziós tényezők hőmérsékletfüggése

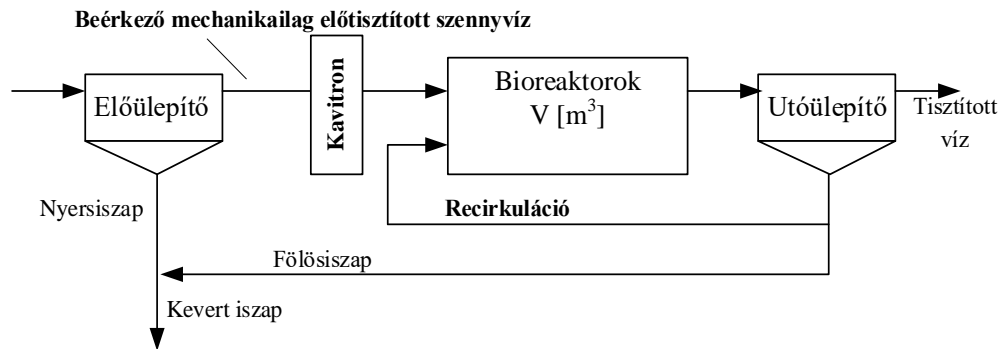
A nyári és a téli tápanyag lebontás aránya a korábbiaknak megfelelő módon számolható:

$$\frac{\Delta S_{nyáron}}{\Delta S_{télen}} \square \frac{1}{Pe_{nyáron}} = \frac{Pe_{télen}}{Pe_{nyáron}} = \frac{D_{S,télen}}{D_{S,nyáron}} = \frac{D_{S,nyáron}}{D_{S,télen}} = \frac{k(t)_{t=22^\circ C}}{k(t)_{t=10^\circ C}} = \frac{0,923}{0,647} = 1,43 \quad (6)$$

A (6) képlet alapján nyáron a tápanyaglebontó képesség 1,43-szoros mértékben 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 hőmérsékletváltozás hatására a biológiai tisztítóképeség ugyan csökken, de nem lehetetlenül el. A végrehajtott beavatkozás – az iszapkor növelése - okozza a telep szinte teljes leállítását. Fogalmazhatunk úgy is, hogy a hőmérsékletváltozás kompenzálására adott válaszlépés nem a legmegfelelőbb.

3.2.3 Hatékonyság növelés a kavitron alkalmazásával

A téli kedvezőtlen viszonyok ellensúlyozására kínálkozik egy másik lehetőség is. A telepre beérkező, mechanikailag már előtisztított szennyvizet vessük alá kavitronos kezelésnek. A beavatkozás helyét lásd 8. ábrán.



8. ábra. A beavatkozás helye

A kezelés hatásának kimutatásához szükséges méréseket a 2. ábrán bemutatott kísérleti berendezésen végeztük el. A berendezés tartályába mechanikailag előtisztított szennyvíz került betöltésre. Ez az iszapminőség érkezik az eleveniszapos reaktorterébe is.

A kavitációs zónán történő többszöri áthaladás során a nyersiszap fajlagos felülete növekedett. A mérések eredményét a 7. táblázatban láthatjuk.

7. táblázat. A nyersiszap fajlagos felületének a változása a kezelés hatására

Iszapminőség	Fajlagos felület kezelés előtt	Fajlagos felület kezelés után	Mérték- egység
Mechanikailag előtisztított szennyvíz	7,5	10	[m ² /g]

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

$$d_{e,recirk+kavitron} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{10 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot 0,865 \cdot V + 9,3 \cdot 8,6 \cdot 1000 \cdot 0,165 \cdot V} = \frac{6}{8650 + 10797} = 3,09 \cdot 10^{-4} \text{ m} \quad (7)$$

A (7) képlet eredménye alapján az egyenértékű szemcseátmérő tovább csökken és vele változik az együttes hatékonysági arányszám is

$$\frac{\Delta S_{recirk+kavitron}}{\Delta S_{recirk}} = \frac{d_{e,recirk}}{d_{e,recirk+kavitron}} = \frac{3,47 \cdot 10^{-4}}{3,09 \cdot 10^{-4}} = 1,12 \quad (8)$$

A kavitronos kezelés további hatékonyság javulást hoz és részben képes ellensúlyozni a téli üzem negatív hatását. Ehhez a (6) és (8) képletek eredményét kell csak összevetni.

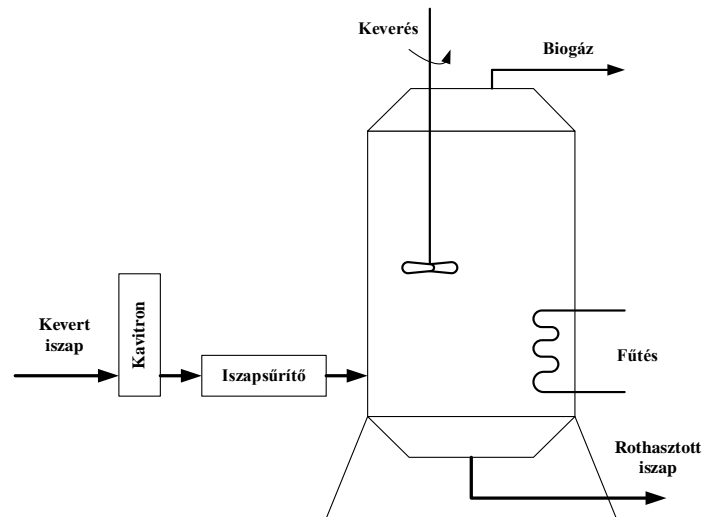
A recirkuláció a kihasználható reaktortér térfogatát csökkenti, hisz a visszaforgatás teret vesz el a folyvást újonnan érkező szennyvíztől. A kavitronos kezelés ezzel szemben nincs hatással a kihasználható térfogatra. Hátrányként jelentkezik viszont, hogy a kavitron hajtásához villamos energiára van szükség, amely a tisztítás költségeit növeli.

A 2. ábrán a kavitron szívóvezetékéhez csatlakozik egy légbeszívó állócső is. A vezetéket elzáró csap megnyitásával az injektorhatás elvén levegő beszívása történt meg. Így az oldott oxigén szintje már 4 perc kezelés után 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 levegő hozzavezetés a biológiai reaktortéren kívül történik, a fúvók teljesítményigénye ezáltal lecsökkenthetővé válik. A kavitron alkalmazásának ez a másik hozadéka.

3.3 A biogáz mennyiségének fokozása

Napi gyakorlat, hogy a biogáz mennyiségének növelése érdekében a rothasztó toronyba kerülő iszapot sűrítjük, illetve a magát a rothasztó tornyot fűtjük. Az előző pontban használt megfontolások segítségével a műveletek hatékonyságának javulását számszerűsíteni is tudjuk.



9. ábra A rothasztó torony hatékonyságának növelése

3.3.1 Az iszapsűrítés hatása

Induljunk ki az iszapminőségek adataiból

8. táblázat Iszapjellemzők rothasztás előtt

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

Az egyenértékű szemcseátmérő a táblázat adataival és jelölésével a sűrítés előtt

$$d_{e, \text{sűrítés előtt}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a * 30 * 1300 * V} = \frac{6}{a * 30 * 1300} \quad (9)$$

Az egyenértékű szemcseátmérő a táblázat adataival és jelölésével a sűrítés után

$$d_{e, \text{sűrítés után}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a * 54 * 1400 * V} = \frac{6}{a * 54 * 1400} \quad (10)$$

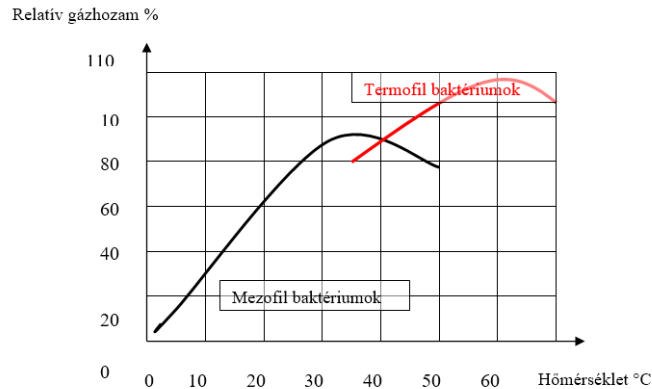
A sűrítésnek a tápanyag lebontásra gyakorolt hatása

$$\frac{\Delta S_{\text{sűrítés után}}}{\Delta S_{\text{sűrítés előtt}}} = \frac{1}{Pe_{\text{sűrítés előtt}}} = \frac{Pe_{\text{sűrítés előtt}}}{Pe_{\text{sűrítés után}}} = \frac{d_{e, \text{sűrítés előtt}} w}{D_s} = \frac{d_{e, \text{sűrítés előtt}}}{d_{e, \text{sűrítés után}}} = \frac{54 * 1400}{30 * 1300} = 1,94 \quad (11)$$

A w , konvektív sebesség, a D_s , szubsztrát 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.

3.3.2 A rothasztótorony fűtése

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



10. ábra. A gázhozam hőmérsékletfüggése

A 10. 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 biofilmbe igyekvő szubsztrát molekulák diffúziós tényezőjének van. A Stokes-Einstein összefüggés értelmében minden molekula diffúziós tényezője azonos módon függ a hőmérséklettől. A 7. ábrának megfelelően a méréssel meghatározott hőmérsékleti koefficienssel a diffúziós tényezők rendre az alábbiak lesznek

$$D_{S, \text{mezofil}} = k(t)_{t=35^\circ\text{C}} D_S|_{t=25^\circ\text{C}} \quad (12)$$

$$D_{S, \text{termofil}} = k(t)_{t=60^\circ\text{C}} D_S|_{t=25^\circ\text{C}} \quad (13)$$

Helyettesítve az értékeket

$$\frac{\Delta S_{\text{termofil}}}{\Delta S_{\text{mezofil}}} \square \frac{1}{Pe_{\text{termofil}}} = \frac{Pe_{\text{mezofil}}}{Pe_{\text{termofil}}} = \frac{\frac{d_e w}{D_{S, \text{mezofil}}}}{\frac{d_e w}{D_{S, \text{termofil}}}} = \frac{D_{S, \text{termofil}}}{D_{S, \text{mezofil}}} = \frac{k(t)_{t=60^\circ\text{C}}}{k(t)_{t=35^\circ\text{C}}} = \frac{2,133}{1,279} = 1,67 \quad (14)$$

Megállapítható, hogy a fűtés a sűrítéshez képest némileg kisebb mértékben javítja a gáztermelést.

3.3.3 Iszapelőkészítés a kavitron segítségével

A toronyba kerülő iszap előkészítése nemcsak sűrítésből állhat, kavitronos kezelésnek is alávethető. A kavitációs zónán történő átvezetés a dezintegrációs eljárások közé tartozik és az

iszappelyhek aprítását idézi elő, miáltal a mikrobák által belakható felület növekszik. A hatás a fajlagos felület mérésével számszerűsíthető. A 2 ábrán vázolt kísérleti berendezés keverőtartályba most a rothasztó torony bemeneti iszapminőségét adó kevert iszap került. A mérések eredményét a 9 táblázatban foglaltuk össze.

9. táblázat. Kevert iszap jellemzői a kavitronos kezelés előtt és után

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

A kavitációs zónán történő átvezetés a szárazanyag tartalomra és a sűrűségeire nincs érdemi hatással, csak a fajlagos felület változik. A változatlanságot a 9. táblázatban az azonos betűjelek mutatják.

Helyettesítve a táblázat ismert (mért) és ismeretlen adatait, az egyenértékű szemcseátmérők az alábbiak lesznek:

$$d_{e, \text{kavitronozás előtt}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a_{\text{kavitronozás előtt}} * \text{sza} * \rho * V} = \frac{6}{32 * \text{sza} * \rho} \quad (15)$$

$$d_{e, \text{kavitronozás után}} = 6 \frac{V}{F} = 6 \frac{V}{a_{\text{kavitronozás után}} * \text{sza} * \rho * V} = \frac{6}{37 * \text{sza} * \rho} \quad (16)$$

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

$$\frac{\Delta S_{\text{kavitronozás után}}}{\Delta S_{\text{kavitronozás előtt}}} = \frac{\frac{1}{Pe_{\text{kavitronozás után}}}}{\frac{1}{Pe_{\text{kavitronozás előtt}}}} = \frac{Pe_{\text{kavitronozás előtt}}}{Pe_{\text{kavitronozás után}}} = \frac{\frac{d_{e, \text{kavitronozás előtt}} w}{D_s}}{\frac{d_{e, \text{kavitronozás után}} w}{D_s}} = \frac{d_{e, \text{kavitronozás előtt}}}{d_{e, \text{kavitronozás után}}} = \frac{37}{32} = 1,16 \quad (17)$$

A hatékonyságjavulást végül a kavitációs behatás utáni és előtti fajlagos felületek aránya adja. A dezintegrációs iszapelőkészítés további 1,16-szoros javulást hoz. Az iszapsűrítés, a rothasztó torony fűtése és a dezintegrációs iszapelőkészítés hatása együttesen a javulás mértéke, amely összevetve 1,81*1,67*1,16= 3,76-szoros lesz a kezelés nélküli állapothoz képest.

Miután a rothasztó toronyok szigorúan anoxikus viszonyok mellett működnek, ezért a dezintegráció során a levegő hozzávezetése kerülendő.

3.4 A növények egészségesebb fejlődéséről

Próbáljunk meg a Bevezetésben vázolt hatékonyabb növényi fejlődés nyomaira bukkanni. Ehhez induljunk ki a 10. táblázat mérési értékeiből.

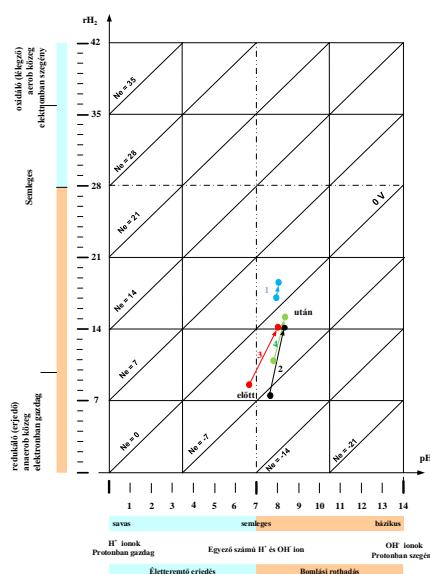
10. táblázat. A kavitronos kezelés hatása

	Száraz anyag	pH		ORP		t		rH ₂ (számítva)		odott O ₂	
	[%]	[-]		[mV]		[°C]		[-]		[mg/liter]	
Kavitronos kezelés		előtt	után	előtt	után	előtt	után	előtt	után	előtt	után
Víz	0	7,63	8,11	-142	-124	25,6	25,9	17,4	19	4,92	8,0
Szennyvíz	0,1	7,71	8,72	-447	-300	23,3	28,7	7,3	14,2	4,53	7,86
Kevert iszap	3,1	6,64	7,68	-337	-240	23,3	30,5	8,9	14,1	0,14	0,69
Rothasztott iszap	3,6	7,80	8,52	-333	-249	30,5	36,3	11,3	15,4	0,17	0,41

Megjegyzés:

A mérések során szerzett tapasztalatok alapján a pH és t értékek stabilan beálltak, ezzel szemben az ORP és oldott O₂ értékek sztochasztikusan változtak, nehezen álltak be. Esetükben maga a mérési érték és a felismerhető trend is meglehetősen bizonytalan.

A táblázat adataiból egyértelműen kitűnik, hogy a kavitációs zónán történő áthaladás a vízben elektrokémiai változásokat hoz létre. A kavitronos kezelés hatását a Vincent-diagramon tehetjük láthatóvá.



11. ábra. A kavitronos kezelés hatása a Vincent diagramon

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 tiszta víz esetében a kavitációs hatás az Ne=0 vonaltól való távoldást jelent, míg az iszapok esetében épp ellenkezőleg, közeledést. Az Ne=0 vonaltól mért merőleges távolság nagysága a tápanyaglebontás köbgyökével arányos (Tolnai, 2019). Közelítve a semleges vonalhoz a biológiai aktivitás csökken, így van ez az iszapok esetén. Távolodva attól előnyösebbek az élettér viszonyai, ezt jelzi a tiszta víz elválása. Hogy a megváltozott elektrokémiai környezet mit jelent a növények fejlődésében, vagy az iszapok „fertőtlenítésében” az további vizsgálatot igényel.

4 EREDMÉNYEK ÉS FELVETÉSEK

A kavitron nedvesőrlő berendezést elsősorban keverékek, mixek előállítására fejlesztették ki. A keverés során a nagy fajlagos felületű adalékanyagon az iszap adszorpciós megkötése válik lehetővé. Az iszap stabilizálásának ez egy szokásos lehetősége.

Eleveniszapos medencéknél a recirkulációnak felületnövelő hatása van, amely javítja a tápanyag lebontás hatékonyságát. Télen, amikor alacsony a hőmérséklet, a leromlott tápanyagbontási hatékonyság részben visszaállítható a kavitronos kezelés által.

A biogáz mennyisége az iszap sűrítésével, a rothasztó tornyok fűtésével növelhető. A kavitronos kezeléssel tovább fokozható ez a hatás. Ez különösen azért fontos, mert az anoxikus rothasztási folyamat időigénye dupla akkora, mint az oxikus körülmények zajló biológiai lebomlása (Tolnai, 2019).

Vízgépek (szivattyúk, turbinák) kavitációját kimutatni többféleképpen lehet. Elsősorban a sajátosan „ropogó” hanghatás alapján vizsgálják a kutatók a jelenséget. Mikrofonok segítségével nemcsak a hangerő, hanem a hangforrás frekvenciája is mérhető, továbbá érzékelhető a hangforrás pontos helye is (Fáy A. 2020). A kavitron gyakorlati alkalmazása a kavitációs roncsolóhatás kihasználásán alapszik. A roncsolást a szuszpenzió szilárd anyagának elváltozása alapján mérjük. Ha nő a fajlagos felület, a roncsolás megtörtént. A roncsolás oka pedig a kialakult kavitáció. Így az is felvethető, hogy vízgépek kavitálásának kimutatásához esetleg érdemes közeget váltani. Tiszta víz helyett a mérések idejére „szennyezett” vizet használni. A roncsolást közvetett módon a szennyezés elváltozásain mérni. Ez esetben nem csupán mikrofonokra, hanem fajlagos felület mérésére alkalmas mérőeszközre is szükség van. Az eltérő detektálási formák egymás kiegészítéseként értékelhetők, amely a jelenség pontosabb feltérképezéséhez vezethet.

5 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kísérletek végrehajtása a GINOP-2.2.1-15-2017-00068 számú innovációs projekt keretében történt (Raab, 2021). (Kedvezményezett a Dunántúli Regionális Vízmű Zrt.) A fajlagos felület méréseket az ELTE Mikrobiológiai Tanszéke végezte el. A szerző köszönettel tartozik a közreműködésért!

6 HIVATKOZÁSOK

Fáy, Á.: Bevezetés a kavitáció fizikájába. <http://mek.niif.hu>, 2020 pp 1-44.

Raab, G.: Bionyersanyag-terméskála kialakítása lokális technológiai sor figyelembe vételével – Hasznosíthatósági vizsgálatok az üzemi körülmények optimalizálásával a DRV Zrt. területén *VízműPanoráma* 2021/6 pp 19-24.

Stadler, J.: Szennyvíziszapok stabilizálása lignit bekeveréssel *Hírcsatorna* 2013 / 1-2. pp 23-26.

Tolnai, B.: A biológiai szűrésről axiomatikus szemléletben. *Hidrológiai Közlöny* 2015. júl.-aug. pp 63-73.

Tolnai, B.: A biofilmen belül zajló folyamatokról. *Vízmű Panoráma* 2019/1 pp 29-33.