

A SZENNYVÍZTISZTÍTÁS SORÁN ALKALMAZOTT KAVITÁCIÓS ELJÁRÁSOK ÁTTEKINTÉSE

CAVITATION PROCEDURES IN WASTEWATER TREATMENT: A REVIEW ARTICLE

Bolló Betti*

ABSTRACT

In the past decade, many researchers have tried different methods for the degradation of organic pollutants, among which a new technology called cavitation has drawn significant attention. In this study different cavitation tools are presented. Finally, on the designed Venturi tube, two-dimensional numerical simulations were investigated by the means of CFD computations.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az egyre növekvő szennyvíziszap kezelése és hasznosítása alapvető környezeti probléma. A szennyvíziszap elhelyezése komoly gondot és költséget okoz, de az új és hatékony eljárásoknak köszönhetően akár még bevételi forrást is jelenthet, de ehhez megbízható, igazolt és engedélyezett, biztonságos szennyvíziszap kezelési technológiára van szükség. A szennyvíziszapot nem ártalmatlanítandó hulladéknak, hanem a talajtrágyázás másodlagos alapanyagának vagy megújuló energiaforrásnak kell tekinteni. A Miskolci Egyetemen folyó kutatás fő gondolata ebből indul ki [1].

A szennyvíziszap mezőgazdasági felhasználásánál nagy figyelmet kell fordítani az előforduló toxikus- és környezetterhelő komponensekre, melyek károsíthatják a talajt, valamint veszélyt jelenthetnek az emberi és állati egészségre, ha bekerül a táplálékláncba, illetve szennyezheti a talaj- és felszíni vizeket is. Mezőgazdasági területre csak aerob-, anaerob-, kémiai kezeléssel stabilizált vagy 3-6 hónapig tárolt iszap helyezhető ki. Számos új kémiai és biológiai módszer dolgoztak ki a kutatók. Az egyik ilyen új, ígéretes fertőtlenítési technológia a kavitáció alkalmazása, amelynek nagy előnye, hogy nem vezet új vegyszereket a szennyvízbe.

A kavitáció során a folyadék nyomása lecsökken a telített vízgőz nyomására, és a folyadékban gőzfázis jelenik meg, ezt nevezzük kavitációs buborékoknak. A kavitációs buborék összeomlásakor energia szabadul fel. A buborék összeomlásakor nagyon magas, több ezer kelvin hőmérséklet lép fel (elméletileg), de ezek nagyon rövid ideig tartanak (~1 μs), és ez idő alatt a

hőmérséklet a környező folyadék hőmérsékletére esik vissza [2].

A kavitációs buborékok összeroppanásakor keletkező lökéshullám nagy nyíróerőket hoz létre a folyadékban, ezzel mechanikailag roncsolva a mikroorganizmusok sejtfalait. A sejtfalak szétszakadása növeli a biológiai lebonthatóságot, és növeli az anaerob emésztést, ami magasabb biogáz-termelést eredményez, valamint kevesebb lesz a retenciós idő, és csökken a szennyvíziszap mennyisége.

A kavitáción alapuló eljárások rendkívül előnye az, hogy nem igényel semmilyen fajta vegyszert és nem termel toxikus anyagokat sem. Az eljárás bármilyen szennyvíziszapra, illetve hígtrágyára alkalmazható, hasznosítható lehet sokféle szerves hulladék kezelésére. Ezenkívül gyorsabb a rothasztás, gyorsabb a szervesanyag-lebomlás.

A kavitációs buborékok összeomlásának azonban vannak káros következményei is. A gázbuborékok összeroppanásakor igen erős zaj keletkezik, valamint kellemetlen rezgést is létrehozhatnak a berendezésben; ezen kívül a környező szilárd testek erózióját okozzák.

Jelen tanulmányban a kavitációt előállító eszközök bemutatásával foglalkozom. Ezután egy általam kiválasztott hidrodinamikai kavitációt előállító eszközön, egy Venturi csövön kétdimenziós numerikus szimuláció eredményeit közlöm.

2. KAVITÁCIÓS ELJÁRÁSOK

A szennyvízkezelés során kétféle kavitációs eljárást különböztetünk meg: az akusztikus (ultrahangos) és a hidrodinamikai kavitációt.

A kavitáció folyamatát leíró alapvető paraméter egy dimenzió nélküli, ún. kavitációs szám:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho \cdot v^2}, \quad (1)$$

ahol ρ a folyadék sűrűsége, p_0 a jellemző nyomás, p_v a telített gőz nyomása (az adott folyadék hőmérsékletén), és a v a folyadék jellemző sebessége. A kavitációs szám csökkenésével nő a kavitáció előfordulásának lehetősége.

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

2.1. Akusztikus kavitáció

Az ultrahangos kezelés során az iszapot nagy intenzitású ultrahanggal sugározzák be, ami a közegekben háromdimenziós, longitudinális hullámok formájában terjed. A szennyvízközeg bármely pontjában az azon áthaladó hullámfrontok nyomásnövekedést, a hullám-völgyek pedig nyomáscsökkenést hoznak létre. A nyomásingadozás mértéke a hanghullámok intenzitásától függ, amely a nem összenyomható közegekben olyan nagy is lehet, hogy a nyomáscsökkenés pontjaiban a folyadék folytonosságát megszakítva mikroszkopikus üregeket, buborékokat hoz létre. A gyorsan keletkezett üregek a hanghullámok áthaladásával pulzálnak, majd robbanásszerűen összeomlanak. Ezek a mikrorobbanások igen hatékonyan roncsolják a sejtfalakat. [3-5] Az ipari szennyvizek kezelésére többnyire akusztikus kavitációt alkalmaznak. Az ultrahangos kavitációs eszközökkel kapcsolatos probléma az, hogy a kavitációs hatások csak a vibráló felület közelében fordulnak elő, ami csökkenti az egész iszap kezelésének lehetőségét

2.2. Hidrodinamikai kavitáció

A legszélesebb körben használt hidrodinamikai kavitációs eszközök a többszörös furatlemezek [6] és az egyszerű Venturi-kialakítások [7, 8]. A hidrodinamikai kavitációt létrehozó berendezések, amelyek lényegében szivattyúból, tartályból, Venturi csőből/furatlemezéből és csövekből állnak, olcsóbbak, mint egy adott méretarányú ultrahangos berendezés, különösen ipari méretekben.

Az áramló folyadék, amikor átmegy a furaton vagy a Venturi-cső szűkületén, a sebesség megnő és Bernoulli egyenletnek megfelelően a helyi nyomás lecsökken. Ha a fojtás elegendően nagy, akkor a helyi abszolút nyomás lecsökken a telített gőznyomásra és mikrobuborékok jelennek meg a folyadékban. A Venturi cső diffúzor részén illetve a furat utáni térrészben a sebesség el kezd csökkenni, a nyomás pedig nőni. A nyomás növekedésével az üregek összeomlanak, amik hatékonyan roncsolják a sejtfalakat.

Rudolf et al. [6] az egy- és többfuratú lemezek létrejövő hidrodinamikai kavitációt vizsgálták, amely során különböző hidraulikai jellemzők méréséből meghatározták a kezdeti kavitációs számot és a veszteségi tényezőt. Megállapították, hogy lényegesen hatékonyabb a több furatos lemezek használata, ahol az energia disszipáció sokkal alacsonyabb.

Számos kutató tanulmányozta a kavitáció kialakulását és terjedését különböző Venturi-konstrukciókon nagy sebességű kamerával [8, 9], PIV (Particle Image Velocimetry) technikával [10] és numerikus modellezéssel [7, 8]. Simpson és Ranade [7] két geometriai paramétert, a Venturi torok hosszának és a

diffúzor szögének a kavitáció kezdetére és mértékére gyakorolt hatását vizsgálta. Egy optimális konfigurációt javasoltak, amelynél kicsi a diffúzor szög ($\beta \approx 7,5^\circ$), valamint a torok hosszának és torok átmérőjének aránya 1 körüli érték. Li et al. [8] numerikus számításaik során számos geometriai paramétert megvizsgáltak, hogy megtalálják a minél hatékonyabb kavitációt előállító eszközt. A számításait kísérletekkel támasztották alá. Azt találták, hogy két fő geometriai paraméter befolyásolja a kavitációs buborékok mennyiségét:

- a kimeneti szög (diffúzor rész szöge), ami erősen befolyásolja a nyomásprofil;
- az átmérő aránya (d/D : torokátmérő/Venturi cső átmérő), ami az energiafogyasztást befolyásolja.

A Venturi-cső geometriája erőteljesen befolyásolja a helyi nyomást és a kavitációt, ezáltal szabályozva a buborék méretét és az energiahatékonyságot.

A furatlemezes kialakítását csak intenzív kémiai reakciók esetén alkalmazzák, míg enyhébb folyamatokhoz (amely általában 15 és 20 bar közötti nyomást igényelnek) a Venturi-konfiguráció a megfelelőbb és energiatakarékosabb módszer [11].

2.2.1 Forgó berendezések

Forgó eszközök esetén a folyadékot megforgatják a berendezés tengelye körül egy kamrában, a helyi nyomás a központi terület közelében lecsökken; ha a folyadék telített gőznyomás értékére esik, akkor úgynevezett örvénykavitáció alakul ki. Ezt követően, ahogy a folyadék a kamra alsó felülete felé halad, ahol a nyomás gyorsan emelkedik, a kavitációs buborékok összeomlanak. Wang et al. [2] egy forgó kavitációs reaktor alkalmazásával rhodamin B vizes oldatán hajtották végre kísérleteiket. Azt tapasztalták, hogy a működési feltételek, mint például a nyomás, a hőmérséklet, a szennyezőanyag kezdeti koncentrációja jelentősen befolyásolta a lebomlási sebességet.

Petkovšek et al. [12] egy ún. kavitációs generátort vizsgáltak, ami nyíró kavitációt hoz létre. A generátor két egymással szemben lévő rotorból áll, amelyeken speciális sugárirányú hornyok forognak az ellenkező irányba. Az eszköz kiemelkedő jellemzője, hogy nem csak kavitációs generátorként működik, hanem hajtó szivattyúként is, így a szerkezet elkerüli a további nyomásesést. A generátor előnye, hogy nagy a kavitációs térfogat, gyors nyomás-visszanyerés lehetséges, alacsony a nyomásvesztés és a telepítése egyszerű.

Badve et al. [13] egy álló- és egy forgórészű álló hidrodinamikai kavitációs reaktort vizsgáltak, ahol a henger kialakítású forgórészen mélyedések vannak elhelyezve, és a kavitációs buborékok várhatóan a forgó felületen, valamint a bemélyedéseken belül jönnek létre. Azt tapasztalták, hogy a kavitáció intenzitása függ a berendezés fordulatszámától. Egy bizonyos fordulatszám felett csökkenni fog a kavitáció

intenzitása, ezért megkeresték a gép optimális üzemi állapotát, amivel jó eredményeket kaptak.

2.3. Kavitációt befolyásoló tényezők

A hidrodinamikai kavitáció kialakulását és intenzitását több tényező is befolyásolja. Egyrészt a kavitációt létrehozó reaktor geometriai paraméterei (mérete, alakja), másrészt a folyadék fizikai tulajdonságai (viszkozitás, felületi feszültség, sűrűség és az oldott gáztartalom).

Fontos kiemelni a hőmérséklet hatását is, mivel a telített vízgőz nyomása a hőmérséklet növekedésével növekszik. A buborékdinamika vizsgálata azt mutatja, hogy a folyadék hőmérsékletének emelkedésével csökken a folyadék viszkozitása, a felületi feszültség és a gázban való oldhatósága, és így csökken a kavitáció intenzitása és az üregmagok száma. A hőmérséklet emelkedése elősegíti a buborék belsejében a gőznyomás növekedését is, amely a buborék kevésbé erőteljes összeomlását eredményezi. Mivel azonban magasabb hőmérsékleten több kavitációs buborékban is előállnak szabad gyökök, az összehatás néha kiszámíthatatlan. Carpenter et al. [14] a hidrodinamikai kavitáció különböző felhasználási területén – például a szennyvízkezelés, nanoemulziók előállítás, biodízel-szintézis, vízfertőtlenítés és nanorészecske szintézis esetén – részletesen tárgyalták a különféle kavitációs eljárások optimalizálását, többek között az optimális hőmérsékleteket is. A szerves anyagok bomlásának mértéke magasabb hőmérsékleten növekszik, de egy bizonyos hőmérséklet után csökkeni fog. Általában szennyvizek esetén 35-40 °C körüli az optimális hőmérséklet, de például olaj hidrolízisének maximum 30°C és 3 bar nyomás a megengedhető.

A kavitációs folyamat eredményességének alapja az összes fent említett paraméter hatásának figyelembe vétele.

3. KAVITÁCIÓS ELJÁRÁSOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A hidrodinamikai kavitációt (HC) előállító berendezések általában sokkal energiahatékonyabbak, mint az akusztikus berendezések (a különböző HC-berendezések energiahatékonyasága 54 és 60% között változik, míg a különböző váltakozó áramú berendezések energiahatékonyasága 3 és 43%). Például Patil és Gogate [15] a metil-paration peszticid lebomlása során azt találták, hogy a hidrodinamikai kavitáció körülbelül 20-szor energiahatékonyabb, mint az akusztikus kavitáció. Hasonló eredményt kapott Jyoti and Pandit [16], akik összehasonlították az akusztikus kavitációt, a hidrodinamikai kavitációt, a hidrogén-peroxid hatékonyságát és ezek kombinációit. Azt tapasztalták, hogy a hidrodinamikai és az akusztikus

kavitáció kombinációja esetén a szennyvízben elpusztult baktériumok mértéke sokkal nagyobb volt. A baktériumok 99,9%-os eltávolítását az akusztikus-hidrodinamikai kavitáció és hidrogén-peroxid kombinálásával érték el.

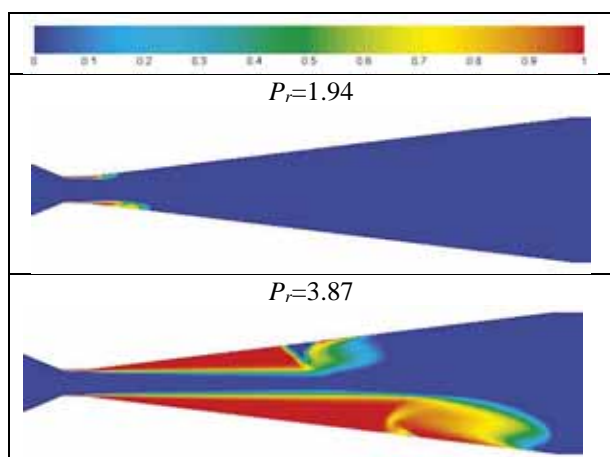
A kavitáció ígéretes technika a szennyvíz fertőtlenítésében. Mivel nem kémiai módszer, ezért alkalmazása nem eredményez semmilyen toxikus mellékterméket, mint például a vízfertőtlenítésnél a klórral végzett kémiai kezelések esetében. Energiahatékony folyamat, és ezért potenciális technikának tekinthető egy nagyszabású vízkezelési rendszer esetében. Érdemes különböző kombinációt alkalmazni (például hidrodinamikai kavitációhoz hidrogén peroxid hozzáadása [16]), hogy minél hatékonyabb legyen a kezelési eljárás.

Az itt leírt kavitációs reaktorok még mindig meglehetősen drágák, összehasonlítva a kémiai fertőtlenítési módszerekkel, ezért ezeknek a módszereknek az alkalmazása lassabban terjed a szennyvízkezelés területén.

4. NUMERIKUS MODELLEZÉS ALKALMAZÁSA A KAVITÁCIÓ JELENSÉGÉRE

A Miskolci Egyetem laboratóriumában [1] létrehoztak egy kísérleti berendezést, amely egy nyitott tartályból, csővezetékéből, egy ürítési pontból áll, valamint egy speciális szivattyúból, amely a folyadék szállításán kívül kavitációs buborékokat állít elő. A szivattyú egy álló és egy forgórészből áll, amelyeken tüskék helyezkednek el. A numerikus modellezés célja volt bebizonyítani, hogy a tüskék közötti térben valóban létrejön gőzfázis. A leghatékonyabb tüskealak és tüskeelrendezés numerikus vizsgálata is feladat volt. Továbbá elemezni kellett a szennyvízösszetétel és a hőmérséklet változása hogyan befolyásolja a kavitáció intenzitását. E bonyolult geometrián való numerikus modellezés előtt célszerű volt egyszerűbb geometriai kialakítás mellett megvizsgálni, hogy a rendelkezésre álló Ansys szoftver alkalmas-e a kavitációs szimuláció elvégzésére. Erre a célra - szakirodalmi ajánlások alapján - a rendszer csővezetékebe egy Venturi kialakítást terveztem. Az elkészült geometrián kétdimenziós numerikus számításokat végeztem [17], aminek segítségével megállapítottam, hogy milyen $P_r = p_{in} / p_{out}$ nyomásviszonynál (a Venturi-cső be- és kilépő keresztmetszetében lévő nyomások arányánál) kezd kialakulni a gőzfázis. Az 1. ábra a Venturi cső torok és diffúzor részén mutatja a gőz/(folyadék + gőz) fázisarányt 0÷1 tartományon (kék_0: 100% folyadék, piros_1: 100% gőz) két nyomásviszonynál ($P_r=1,94$ és $3,87$). A kavitáció hossza a nyomásviszony növekedésével nő. Az ábrán látható, hogy a gőzfázis a torok után a cső falán keletkezik, és az eloszlás a felső és az alsó falon nem szimmetrikus. Abdulaziz [9] kísérletei hasonló eredményeket hoztak, azaz aszimmetrikusan alakultak ki a kavitációs terek.

Megállapította, hogy a kavitáció a torok alsó szélén kezdődik, és a nyomásviszony növelésével a gőzfázis aszimmetrikus eloszlása még szembe tűnőbb.



1. ábra Fáziseloszlás különböző nyomásviszonynál.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Bemutatásra kerültek a szennyvíztisztítás során alkalmazható kavitációs eszközök. Ezek közül egy Venturi-kialakításon numerikus számítások készültek, bebizonyítva, hogy a rendelkezésre álló szoftver megfelelően tudja kezelni a gőzfázis kialakulását. A további lépés a rendelkezésre álló speciális szivattyú modellezése lesz, amely kavitációt képes előállítani.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The research was carried out within the framework of the GINOP-2.2.1-15-2017-00069 **R&D Project** in the framework of Széchenyi 2020 program, financed by the Hungarian Government.

7. IRODALOM

[1] Establishing products range from bio raw materials with the special regard to a local technological flowsheet. GINOP-2.2.1-15-2017-00069 R&D Project. Project Leader: Dr. Ljudmilla Bokányi.

[2] WANG X. et al.: Chemical effect of swirling jet-induced cavitation: Degradation of rhodamine B in aqueous solution, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 15 (2008) pp.357-363.

[3] BRAEUTIGAM P., FRANKE M., ONDRUSCHKA B.: Effect of ultrasound amplitude and reaction time on the anaerobic fermentation of chicken manure for biogas production, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 63 (2014), pp. 109-113.

[4] HARRISON S.T.L.: Bacterial cell disruption: a key unit operation in the recovery of intracellular products, *Biotechnology Advances*, Vol. 9 (1991), pp. 217-240.

[5] NICKEL K.: Ultrasonic disintegration of biosolids – benefits, consequences and new strategies, *TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering*, Vol. 35 (2002), pp. 189-199.

[6] RUDOLF P., et al.: Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries, *EPJ Web of Conferences*, Vol. 143, P.02098 (2017).

[7] SIMPSON A., RANADE V.V.: Modeling Hydrodynamic Cavitation in Venturi: Influence of Venturi Configuration on Inception and Extent of Cavitation, *AIChE Journal*, Vol. 65 No.1 (2019), pp. 421-433.

[8] LI M., BUSSONNIÈRE M., BRONSON M., XU Z., LIU Q.: Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles, *Minerals Engineering*, Vol. 132 (2019), pp. 268-274.

[9] ABDULAZIZ A.M.: Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53 (2014), pp. 40-48.

[10] BERTOLDI D., DALLALBA C., BARBOSA J.: Experimental analysis of flash cavitation of a binary mixture in a Venturi tube, *IV. Journeys in Multiphase Flows (JEM2015)*, PaperID: JEM-2015-0066 (2015).

[11] Gogate P.R., Pandit A.B.: review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future, *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 12 (2005), pp. 21-27.

[12] PETKOVŠEK M. et al.: A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration. *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 26 (2015), pp. 408-414.

[13] BADVE M., GOGATE P., PANDIT A., CSOKA L.: Hydrodynamic cavitation as a novel approach for wastewater treatment in wood finishing industry, *Separation and Purification Technology*, Vol.106 (2013), pp. 15-21.

[14] CARPENTER J. et al.: Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry, *Reviews in Chemical Engineering*, Vol. 33(5) (2017), pp. 433-468.

[15] PATIL P.N., GOGATE P.: Degradation of methyl parathion using hydrodynamic cavitation: Effect of operating parameters and intensification using additives, *Separation and Purification Technology*, Vol. 95 (2012), pp. 172-179.

[16] JYOTI K.K., PANDIT A.B.: Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation, *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 7 (2001), pp. 201-212.

[17] BOLLÓ B.: Modelling of hydrodynamic cavitation for treatment of wastewater in a Venturi tube. *Review of Faculty of Engineering Analecta Szegedinensia*, Vol. 14 No.1 (2020), pp. 61-66.