



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Nasib Naseri

Sonokemian käyttö jäteveden puhdistuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

17.5.2019

Tekijä Otsikko	Nasib Naseri Sonokemian käyttö jäteveden puhdistuksessa
Sivumäärä Aika	33 sivua 17.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Kemiantekniikka
Ohjaajat	toimitusjohtaja, DI Matias Tainela, Altum Technologies Oy lehtori Eija Koriseva
<p>Tämä opinnäytetyö käsittelee ultraäänikavitaatioon perustuvaa sonokemiaa. Sonokemiaa voi hyödyntää monella tavalla. Työn tavoitteena oli kirjallisuuden avulla selvittää, miten sonokemian avulla voidaan teoriassa optimaalisesti tuottaa radikaaleja ja miten radikaalien avulla voidaan puhdistaa jätevettä. Tässä työssä on selvitetty, millä taajuuksilla, tehoilla ja ultraäänien käsittelyajoilla saadaan jätevesi puhdistettua tehokkaimmin. Tutkittiin teoriassa erilaisia ultraääniteknologian sovelluksia vedenkäsittelyprosessissa, kuten membraanisuodatusta, sameuden käsittelyä, lietteen kiintoainepitoisuuden kasvattaminen, levien poistoa ja desinfiointiprosessia. Työn toimeksiantaja oli Altum Technologies Oy.</p> <p>Tulokset osoittavat, että ultraäänikavitaatioon perustuvalla sonokemialla voi parantaa jäteveden käsittelyprosessia ympäristöystävällisesti. Tekniikalla on pystytty alentamaan jätevesien lietteen pitoisuutta kymmeniä prosentteja.</p>	
Avainsanat	Sonokemia, kavitaatio, ultraääni

Author Title	Nasib Naseri Use of Sonochemistry in Wastewater Treatment
Number of Pages Date	33 pages 17 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio and Chemical Engineering
Professional Major	Chemical engineering
Instructors	Matias Tainela, CEO of Altum Technologies Oy Eija Koriseva, Senior teacher
<p>This thesis deals with sonochemistry based on ultrasound cavitation. Sonochemistry can be utilized in many ways. The aim of this work was to find out how sonochemistry can be used to optimally produce radicals and how radicals can be used to purify wastewater. In this work, it has been clarified which frequencies, power, and ultrasonic processing times are the most efficient way to treat wastewater. Various applications of ultrasonic technology in the water treatment process, such as membrane filtration, turbidity treatment, waste water solids removal, algae removal and disinfection, were studied. The initiator of the project was Altum Technologies Oy.</p> <p>The results show that ultrasonic sonication based sonochemistry can improve the water treatment process in an environmentally friendly manner. The technology has been able to reduce tertiary sludge concentrations by tens of percentage.</p>	
Keywords	Sonochemistry, cavitation, ultrasound

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ultraääni	2
3	Kavitaatio	3
3.1	Kavitaatiokuplan synty	4
3.2	Kavitaatiokuplien romahtaminen	5
3.3	Kavitaatiokuplan dynaaminen laskuyhtälö	7
4	Sonokemia	8
5	Jäteveden puhdistus	11
6	Jäteveden käsittely ultraäänellä	14
6.1	Ultraäänen käyttö membraanisuodatuksessa	15
6.2	Ultraäänen käyttö sameuden vähentämiseksi	16
6.3	Levien poisto jätevedestä ultraäänen avulla	18
6.4	Lietteen käsittely ultraäänellä	21
6.5	Ultraääneen käyttö veden desinfiointiprosessissa	26
7	Yhteenveto	30
	Lähteet	33

1 Johdanto

Jäteveden käsittely on prosessi, jota käytetään poistamaan jätevedestä epäpuhtaudet ja muuntamaan se vedeksi, joka voidaan palauttaa luontoon tai käyttää muihin tarkoituksiin. Käsittelyprosessi tapahtuu jätevedenpuhdistamoissa.

Jäteveden puhdistamisessa on paljon haasteita, kuten suuret kustannukset ja kemikaalien käyttö. Yksi haasteista on jäteveden kiintoaineeseen sitoutunut vesi, jota on vaikea poistaa. Myös veden desinfiointi tuo lisää haasteita jätevedenkäsittelyyn. Tämän takia tutkijat etsivät uusia teknologioita ongelman ratkaisemiseksi.

Myös Suomessa etsitään uusia ratkaisuja jäteveden puhdistamiselle. Esimerkiksi Altum Technologies on tutkinut aihetta kokeellisesti ja löytänyt ongelmaan uusia tehoultraääniteknologiaan perustuvia ratkaisuja.

Ultraääni on yksi innovatiivisista tekniikoista, joita tutkitaan vedenkäsittelyprosessin parantamiseen. Ultraäänen avulla voi käsitellä jätevettä ympäristöystävällisesti. Ultraäänikäsittelyn avulla voidaan hajottaa lietettä ja vapauttaa siten lietteeseen sitoutunutta vettä.

Ultraäänen avulla saadaan nesteessä aikaan kavitaatiota, joka tekee mahdolliseksi joitakin sonokemiallisia prosesseja. Näitä prosesseja voidaan soveltaa jäteveden puhdistuksessa. Sonokemiassa hyödynnetään esimerkiksi erittäin reaktiivisia radikaaleja, jotka muodostuvat kavitaation ansiosta. Radikaalien avulla esimerkiksi jäteveden desinfiointi on mahdollista.

Tässä työssä kartoitetaan sonokemian käyttöä jäteveden puhdistuksessa.

Aluksi esitetään ultraäänikavitoinnin ja sonokemian perusteet ja kuvataan jäteveden puhdistuksen yleiset periaatteet. Sen jälkeen selvitetään, miten sonokemiallisia menetelmiä voidaan soveltaa, kun tavoitteena on.

- jäteveden desinfiointi
- levien poisto jätevedestä

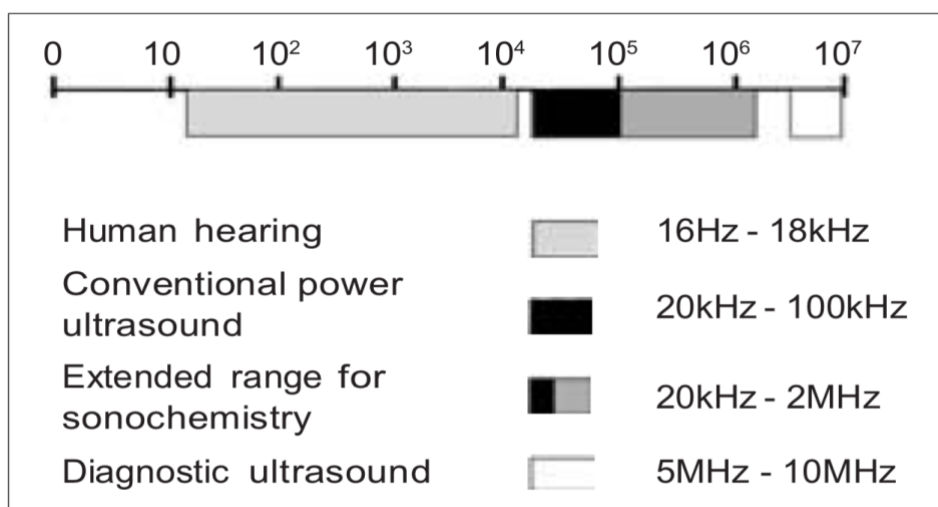
- jäteveden sameuden vähentäminen
- jäteveden membraanisuodatus
- lietteen kiintoainepitoisuuden kasvattaminen.

Kukin edellä mainittu tapaus kuvataan, varsinkin puhdistukseen liittyvät haasteet ja ongelmat. Tämän jälkeen selvitetään, mikä on jäteveden puhdistuksessa ultraäänen optimaalinen taajuus, intensiteetti, teho ja sonokointiaika.

Työn toimeksiantaja on Altum Technologies Oy, joka käyttää ultraääneen perustuvia ratkaisuja teollisuuden putkistojen ja lämmönvaihtimien puhdistamiseen.

2 Ultraääni

Ultraääni on mekaanista aaltoliikettä, jonka taajuus on niin korkea, ettei ihmisen korva voi kuulla sitä. Ultraäänen taajuus on yli 20 kHz. Ultraääni ei etene tyhjiössä vaan tarvitsee edetäkseen aina väliaineen. Kiinteissä aineissa ultraääni etenee sekä pitkittäisenä että poikittaisena aaltoliikkeenä. Sen sijaan kaasuihin ja nesteisiin vain pitkittäinen ultraäänen aaltoliike on mahdollinen. Ultraäänen lyhyttä aallonpituutta voidaan verrata ominaisuuksiltaan valoaaltoon, ja ultraääniaalloilla voi tapahtua esimerkiksi taittumista ja heijastumista. Seuraavassa kuvassa 1 on esitetty äänen taajuusalueet. [1. s.372]



Kuva 1. Ääneen taajuusalueet. [1]

Tehoultraääntä voidaan hyödyntää monella tavoin, esimerkiksi muovihitsauksessa, puhdistuksessa, syöpäkudoksen tuhoamisessa, vaahdonpoistossa ja kaasunpoistossa nesteistä. [2.]

Normaalissa ultraäänikuvantamisessa käytettävät tehot ovat tyypillisesti <1 W, eikä siinä yritetä useimmiten vaikuttaa kohteeseen. Tehoultraäänien tapauksessa tehot voivat olla satoja watteja tai jopa kilowattien luokkaa ja siinä yritetään ultraääniaktuaatiolla vaikuttaa kohteeseen, esimerkiksi tehoultraäänellä irrottaa likaa kohteesta. [3.]

3 Kavitaatio

Kavitaatio on prosessi, jossa mekaaninen aktivointi kumoaa nestemäisen faasin molekyylien puoleensavetävät voimat. [4.]

Kavitaatioilmiön huomasivat ensimmäisen kerran Thornycroft ja Barnaby vuonna 1895. He havaitsivat, että sukellusveneen potkuri vioittui ja sen teho heikkeni suhteellisen lyhyen toimintajakson aikana. Tämän ilmiön aiheutti hydrodynaaminen kavitaatio. [5.]

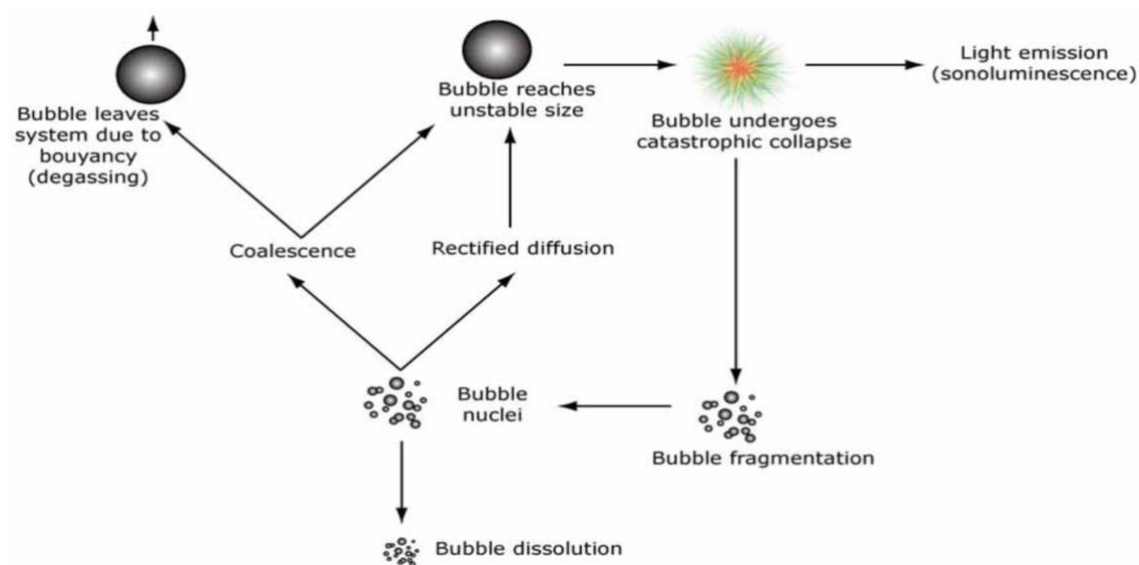
On olemassa kahta erilaista kavitaatiota: hydrodynaaminen ja akustinen kavitaatio. Hydrodynaaminen kavitaatio tapahtuu virtaavassa nesteessä. Akustisessa kavitaatiossa neste ei välttämättä virtaa vaan äänikentän värähtelyn seurauksena syntyy kavitaatiokuplia. Tässä työssä keskitytään akustiseen kavitaatioon. [5.]

Vuonna 1917 lordi Rayleigh julkaisi ensimmäisen matemaattisen mallin, joka kuvaa kavitaatiotapahtumaa kokoonpuristumattomassa nesteessä. Vuonna 1927 Loomis selvitti kavitaation hyötyjä kemiallisissa ja biologisissa reaktioprosesseissa. Jäteveden puhdistuksessa akustisen kavitaation käyttö mahdollistaa esimerkiksi, että prosessissa ei tarvitse käyttää kemikaalia. [4.]

3.1 Kavitaatiokuplan synty

Kavitaatiokuplan muodostumiseen on kolme malleja. Kavitaatiokuplat muodostuvat, kun nesteessä on ollut pienempiä kuplia tai nesteessä on ollut kiinteitä hiukkasia, joiden pinnalle on jäänyt kaasua, joista muodostuu kuplia. On myös mahdollista, että säiliön seinissä on ollut pieniä rakoja, joissa kaasu on ollut loukussa. [6.]

Akustisessa kavitaatiossa ääniaalto aiheuttaa värähtelevän painekentän nesteeseen. Harventumisjakson aikana nesteessä tapahtuu lyhytaikaisia painehäviöitä, ja tästä seuraa kavitaatio eli nesteeseen muodostuu värähteleviä kaasumaisia pieniä kuplia. Koalesenssi on ilmiö, jossa pienemmät kuplat yhdistyvät ja muodostavat suuremman kuplan. Kaasun poistuminen tapahtuu silloin, kun kuplat kasvavat liian suureksi ja poistuvat nesteestä nosteen vaikutuksesta. Seuraavassa kuvassa 2 on esitetty, millä eri tavoilla kuplat muodostuvat. [6.]



Kuva 2. Pienistä kuplista muodostuu isompi kupla. Liian suuret kuplat poistuvat nesteestä. Jotkut kuplat saavuttavat epävakaan koon ja romahtavat. Jos olosuhteet ovat sopivia, muodostuu valon emissio. [5.]

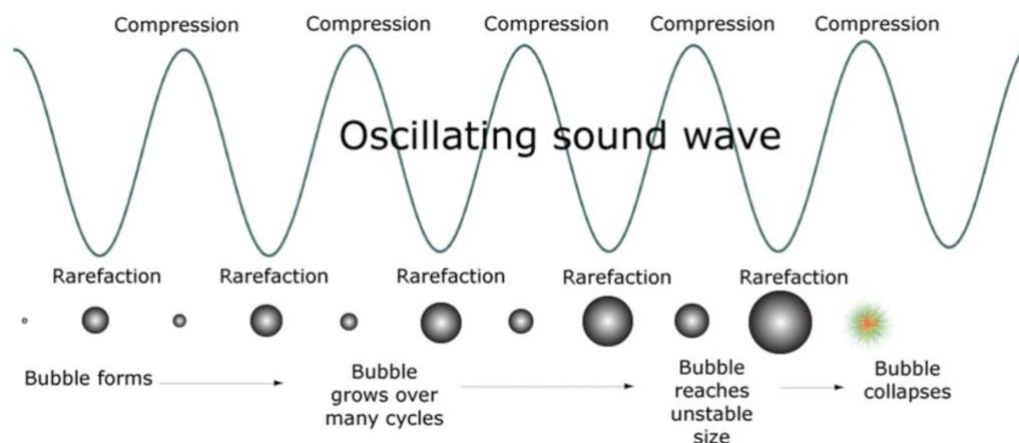
Kaasukuplien sisäinen paine on pienempi kuin ulkoinen paine eli tapahtuu diffuusio. Väkevöintidiffuusion ansiosta kavitaatiokuplien koot kasvavat akustisen syklin aikana. Diffuusiosta molekyylit pyrkivät siirtymään väkevämmästä pitoisuudesta laimeampaan ja mahdolliset pitoisuuserot tasoittuvat. Aineensiirto ei ole tasapainossa väkevöintidiffuusiosta, koska kavitaatiokuplaan absorboituu enemmän kaasua harventumisen aikana kuin tiivistymisessä kuplasta poistuu. [7.]

3.2 Kavitaatiokuplien romahtaminen

Kavitaatiokupla romahtaa hyvin pian kuplan muodostamisen jälkeen. Kuten kuvasta 3 nähdään, kupla kasvaa, kunnes se saavuttaa kriittisen koon eli resonanssikokonsa. Kuplan resonanssikoko riippuu äänikentän taajuudesta. Kun kuplat saavuttavat resonanssikokonsa, kuplasta tulee epävakaata ja se romahtaa. Ultraäänen vaikutuksesta kavitaatiokupla kasvaa. Sykliä takia kuplan koko muuttuu jatkuvasti eli kupla pienenee ja suurenee. Ultraäänen vaihe vaikuttaa sykliä vaiheeseen. Tiivistyminen ja harventuminen ovat aallon vaiheita. Jokainen sykli sisältää sekä tiivistymisen että harventamisen vaiheita. Seuraavassa kuvassa 3 nähdään kuplan kasvua ja romahdusta useiden syklien aikana. [5.]

Usein romahdus tapahtuu yhden akustisen syklin aikana. Tätä ilmiötä kutsutaan ohimeneväksi kavitaatioksi. Jos kupla pysyy koossa monen värähtelyn jälkeen, sitä kutsutaan stabiiliksi kavitaatioksi. Myös on mahdollista, ettei stabiili kupla romahda ollenkaan. Termejä ohimenevä ja stabiili kavitaatio käytetään myös määrittämään, ovatko kuplat aktiivisia valon emissiossa tai kemiallisessa reaktiossa. [5.]

Kavitaatiokuplan romahtaminen on eksotermisen ilmiö. Eksotermisessä reaktiossa lämpöä vapautuu eli nesteen lämpötila nousee. Kavitaatiokuplat romahtavat hyvin nopeasti, koska kuplat ovat adiabaattisia. Systeemiä, joka ei vaihda lämpöä ympäristön kanssa, kutsutaan adiabaattiseksi systeemiksi. [7.]



Kuva 3. Kavitaatiokuplien koko muuttuu syklisesti. Kavitaatiokupla suurenee ultraäänen harventumisvaiheen aikana ja vastaavasti tiivistymisvaiheen aikana pienenee. Usean syklin jälkeen kupla on epästabili ja romahtaa. Romahduksen seurauksena vapautuu lämpöä. [5.]

Kavitaatiokuplan koko kasvaa, joko koalesenssilla tai väkevöintidiffuusiolla. Jos olosuhteet ovat sopivia, voidaan nähdä valoa romahduksen aikana. Väkevöintidiffuusion kynnysarvon alapuolella olevat kuplat voivat liueta liukseen eli ne eivät romahda ollenkaan. On mahdollista laskennallisesti ennustaa kaasukuplan käyttäytymistä edellyttäen, että tiedetään kuplan säde, ultraäänen taajuus, ultraääniaallon paineen voimakkuus (amplitudi) ja liuenneen kaasun konsentraatio. [5.]

20 kHz:n ultraäänitaajuudella äänikentässä syntyvät kuplat ovat suhteellisen suuria ja niiden romahdus johtaa voimakkaisiin iskuihin, jotka voivat olla hyödyllisiä esimerkiksi emulgoinnissa. Emulgointia käytetään sekoittamaan toisiaan hylkiviä nesteitä, esimerkiksi öljyä ja vettä. 100 – 1 000 kHz:ssä syntyvät kuplat ovat paljon pienempiä. Niiden romahdus aiheuttaa kuitenkin korkeamman lämpötilan nousun, joka voi olla käyttökelpoisempi sonokemiallisissa tarkoituksissa. Yli 1 MHz:n taajuudella kavitaatiovaikutukset ovat paljon heikompia. Tällä taajuusalueella on kuitenkin joitakin teollisia sovelluksia, kuten elektronisten osien hellävarainen puhdistus. Tätä korkeampaa taajuusaluetta käytetään yleensä lääketieteellisiin tarkoituksiin. [5.]

3.3 Kavitaatiokuplan dynaaminen laskuyhtälö

Sonokemian tärkeät parametrit ovat liuoksen paine, ultraääniäallon paineen amplitudi, ultraääniäallon taajuus, lämpötila, kaasupitoisuus, pintajännitys ja säiliön muoto. Näiden parametrien ja kuplan pienen koon ja radikaalien eri konsentraatioiden vuoksi teoreettiset ja kokeelliset tutkimukset ovat erittäin vaikeita. Tästä huolimatta on tehty useita tutkimuksia tästä ilmiöstä. Rayleigh ja Plesset tutkivat yhden kavitaatiokuplan dynaamista käyttäytymistä ja johtivat Rayleigh-Plessetin yhtälön. [8.]

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{R} \left(\frac{P_b - P_\infty - 4\mu v/R}{\rho_l} - \frac{3}{2} v^2 \right) \quad (1)$$

jossa v on kuplan seinämän nopeus, t on aika, R on kuplan säde, P_b on paine kuplan sisällä, P_∞ on paine kuplan ulkopuolella, ρ_l on nesteen tiheys ja μ on nesteen viskositeetti.

Kuplien dynamiikan teoreettiset mallit ovat tulleet yhä kattavammiksi ja tarkemmiksi ja tarjoavat hyödyllisiä oivalluksia sonokemiallisista ilmiöistä. Myös vapaiden radikaalien tuotantoa ultraäänikentillä on tutkittu laajasti. Anbar ja Pecht tutkivat vetyperoksidin sonokemiallisen muodostumisen sijaintia nesteessä. Hart ja Henglein suorittivat laajoja kokeita vetyperoksidin tuotantonopeudesta. Gong ja Hart esittivät mallin, joka yhdistää kuplan romahduksen dynamiikan ja kaviaation kemiallisen kinetiikan. Monissa malleissa ei ole otettu huomioon kuplan lämpötilaa, ja monet ominaisuudet oletetaan vakioksi, kuten entalpia ja entropia, vaikka ne ovat tärkeitä sonokemiallisen käyttäytymisen kannalta. [8.]

4 Sonokemia

Ultraäänen tuottama kavitaatio on hyödyllinen asia. Sonokemia tarkoittaa kemian aluetta, jossa kemiallisia reaktioita synnytetään ja muokataan äänen avulla. Sonokemiassa yleisesti käytetty ultraäänitaajuusalue on 20 kHz:stä 1 MHz:iin. [6.]

Ultraäänilaitteiden toiminta perustuu siihen, että niillä lähetetään mekaanisia ultraääniaaltoja, jotka aktivoivat väliaineeseen tihentymiä ja harventumia, joilla saadaan aikaiseksi sonokemiallisia ilmiöitä. [3.]

Ultraäänen kemiallisilla vaikutuksilla on pitkä historia. Alfred L. Loomis huomasi ultraäänen kemialliset vaikutukset vuonna 1927. Sonokemian tutkimus lisääntyi, kun tuli saataville edullisia ja luotettavia korkean intensiteetin ultraäänilaitteita. Esimerkki tällaisesta kaupallisesta ultraäänijärjestelmästä on esitetty seuraavassa kuvassa 4. [6.]

Ultraääniantureissa on pietsosähköiset kiteet. Elektrodien yli johdetaan muuttuva jännite, joka muuntuu anturissa mekaaniseksi ultraääniaalloksi. [3.]



Kuva 4. Kaupallinen suuritehoinen ultraäänilaite, jota käytetään laboratorio-sonokemiassa. [6.]

Tutkimus on osoittanut, että ultraääntä hyödyntämällä on stokiometristen ja katalyyttisten kemiallisten reaktioiden saantoon saatu huomattavia parannuksia. Esimerkiksi on osoitettu, että tietyissä tapauksissa ultraäänieksitaatio voi lisätä reaktiivisuutta lähes miljoonakertaiseksi. [6.]

Ultraäänen kemialliset vaikutukset jakautuvat kolmeen alueeseen:

- nesteiden homogeeninen sonokemia
- neste-nestepohjainen tai neste-kiinteä aine -pohjainen heterogeeninen sonokemia
- sonokatalyyysi, joka kattaa kaksi ensimmäistä aluetta.

Koska kavitaatiota voi tapahtua vain nesteissä, sonokemiallisia reaktioita ei esiinny kiinteissä aineissa tai kaasuissa. [6.]

Ultraäänellä on paljon erilaisia sonokemiallisia sovelluksia. Ultraääni edistää hapetusreaktioita, polymerointia ja depolymerointia, vaikuttaa polarisoidun elektrodin potentiaaliin, lisää kiteytymisen nopeutta ja helpottaa öljyjen uuttamista. [6.]

Ultraäänen kemiallisiin vaikutuksiin liittyviä mekanismeja on tutkittu laajalti. Kemiallisen vaikutuksen aikaansaamiseksi nesteessä pitää olla riittävästi energiaa, jotta muodostuu kavitaatiota. Kavitaation seurauksena nesteeseen muodostuu kuplia ja kuplien romahtamisesta vapautuu nesteessä energiaa. On tärkeää välttää liuosten täydellinen kaasunpoisto, koska silloin nesteistä poistuvat kavitaation edellyttämät kuplat. [6.]

Höyrynpaineen muutokset vaikuttavat reaktion saantoon. Sonokemiallisten reaktioiden nopeus pienenee liuottimen höyrynpaineen kasvaessa ja kasvaa liuottimen höyrynpaineen laskiessa. [6.]

Kaikki ultraäänen hyödylliset kemialliset vaikutukset eivät johdu kavitaatiosta. Esimerkiksi kumin valmistaminen on terminen prosessi. Kumin lämpöjohtavuus on hyvin alhainen. Kumi kovetetaan tavanomaisesti johtamalla lämpöä ulkopuolisesta lähteestä. Tämä prosessi johtaa epäyhtenäiseen lämmitykseen ja kovettumiseen. Kovettumatonta

kumia voidaan kuumentaa tasaisesti käyttämällä ultraäänienergiaa. Tässä tapauksessa lämmitys ei ole riippuvainen materiaalin lämmönjohtavuudesta, vaan ultraäänienergian absorptiosta kumissa. Tuloksena on tasaisemmin ja nopeammin kovetettu kumituote. [6.]

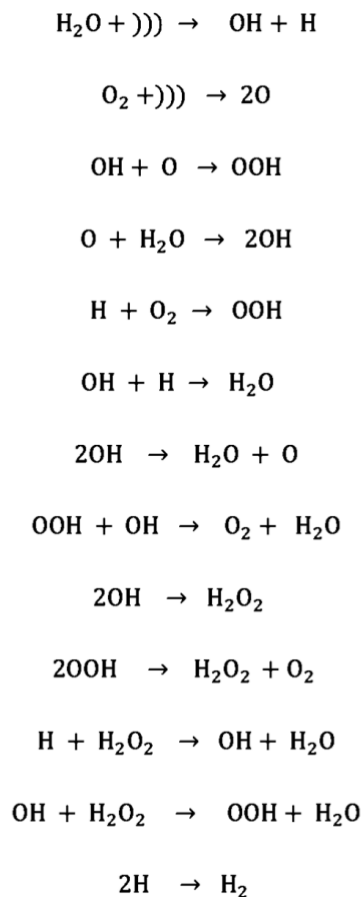
Sonokemiallisia mekanismeja tutkitaan edelleen ja pyritään löytämään uusia kaupallisia ja teollisia sovelluksia. Ultraääni voi lisätä normaaleissa olosuhteissa tapahtuvan reaktion nopeutta tai aiheuttaa reaktioita, joita ei tapahdu normaaleissa olosuhteissa. [6.]

Kuplien romahduksen tuottama lämpötila voi johtaa kemiallisten radikaalien muodostumiseen. Prosessia, jossa vesimolekyyleja hajotetaan ultraäänellä, kutsutaan veden sonolyysiksi. Vesimolekyylit hajoavat kolmessa vaiheessa, ja niiden hajoamisesta syntyy erilaisia radikaaleja. Tätä kutsutaan vesipyrolyysiksi (pyrolyysi on prosessi, jossa materiaalia hajotetaan korkeassa lämpötilassa). [5.]

Ensimmäisessä vaiheessa radikaalit syntyvät romahtavan kavitaatiokuplan sisällä. Kavitaatiokuplan alueella on korkea paine ja lämpötila. Tällä alueella muodostuu aktiivisia radikaaleja, kuten OH ja H. Toisessa vaiheessa kavitaatiokuplan ja nesteen rajapinnassa on runsaasti OH-radikaaleja. Hydroksyyliiradikaali on erittäin reaktiivinen ja pyrkii olemaan vuorovaikutuksessa nopeasti muiden radikaalien tai kemiallisten aineiden kanssa liuoksessa. OH-radikaalit ovat erittäin hapettavia. [1. s.385]

Kolmannessa vaiheessa tapahtuvat OH- ja H-radikaalien väliset reaktiot. Tässä vaiheessa voidaan näitä radikaaleja saada hajottamaan vaarallisia orgaanisia kemikaaleja. Radikaalit reagoivat orgaanisten aineiden kanssa, ja näin aineet hajoavat. Tämän takia viime vuosien aikana ultraääntä on käytetty tehokkaasti hapettumisprosesseissa. Tätä prosessia käytetään muun muassa jäteveden käsittelyyn. Jäteveden puhdistuksessa ultraääninen etuna on, että ultraäänimenetelmä ei vaadi lisättyjä kemikaaleja, hapettimia tai katalyyttejä eikä synny ylimääräisiä jätevirtoja muihin prosesseihin verrattuna. Hajoamisnopeuden on kuitenkin havaittu olevan melko hidas. Useat tekijät, kuten ultraääninen taajuus, liuoksen pH ja vetyperoksidin lisääminen voivat nopeuttaa hajoamista. Vesipyrolyysissä muodostuneet OH- ja H-radikaalit reagoivat myös keskenään ja niistä muodostuu esimerkiksi vetyperoksidia, vetymolekyylejä ja

vettä. Seuraavassa kuvassa 5 on esitetty, minkälaisia yhdisteitä syntyy radikaaleista. [1. s.385]

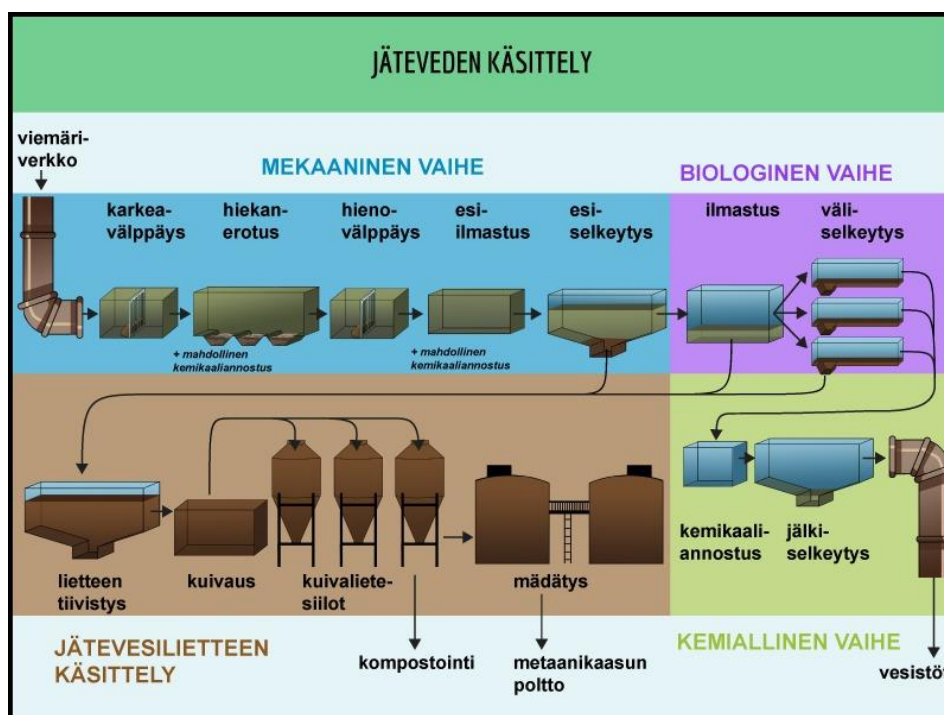


Kuva 5. Vesimolekyylillä hajoaa ja siitä syntyy OH- ja H-radikaali. Nämä radikaalit reagoivat joko keskenään tai muiden aineiden kanssa liuoksessa. Yleensä radikaaleista muodostuu vetyperoksidia. [5.]

Happi parantaa sonokemiallista aktiivisuutta, mutta hapen läsnäolo ei ole välttämätöntä veden sonolyysissä, koska sonokemialliset hapetus- ja pelkistysprosessit voivat edetä minkä tahansa kaasun läsnäollessa. [5.]

5 Jäteveden puhdistus

Jätevesi on käytöstä poistettu likaantunut vesi, joka voi saada aikaan ympäristön pilaantumista. Jätevettä muodostuu esimerkiksi kotitalouksissa, kouluissa, sairaaloissa ja erilaisissa tehtaissa. Suurin osa jätevedestä on vettä, mutta se sisältää myös ympäristölle haitallisia aineita, kuten organista aineista, typpeä, fosforia ja kiintoainetta. Orgaaninen eli eloperäinen aine saa aikaan mikrobin lisääntymisen ja kehityksen vedessä. Se päättyy jäteveeten muun muassa teollisuusjätevesistä, keittiöstä ja WC-vesistä. Typpi ja fosfori aiheuttavat rehevöitymistä vesistöissä. Jätevesiin ne joutuvat esimerkiksi pesuaineista ja virtsasta. Lisäksi jäteveeten kulkeutuvat ravinteet, kuten fosfori ja typpi, lisäävät levien kasvua. Levät aiheuttavat vesistöissä sekä happikatoa että pohjakaasvillisuuden kuolemista. Kemikaalit ovat ympäristölle haitallisia ja ne päättyvät jäteveeten esimerkiksi kosmetiikasta, teollisuudesta, vessasta ja hävitetyistä lääkkeistä. Kuvassa 6 on esitetty jäteveden käsittelyn puhdistusvaiheet. [9; 10.]



Kuva 6. Jäteveden puhdistusprosessin eri vaiheet. [11.]

Jäteveden käsittely jätevedenpuhdistamolla alkaa mekaanisella puhdistuksella. Mekaanisen puhdistuksen ensimmäisessä vaiheessa jätevedestä poistetaan suuret kiinteät aineet, esimerkiksi kotitalouksista viemäriin kulkeutuneet muoviset hammasharjat, vaipat ja vanupuikot sekä muut karkeat ja kuitumaiset epäpuhtaudet

välppäyksen avulla. Välppä on laite, joka koostuu yhdensuuntaisista välppäsaivoista. Kiinteät aineet jäävät kiinni välppäsaivoihin, mutta niiden välistä jätevesi pääsee virtaamaan seuraavaan vaiheeseen. Seuraavassa vaiheessa jätevedestä erotetaan hiekka ja rasvaa. Hiekan- ja rasvanerotukseen käytetään hyväksi painovoimaa, jolloin vettä kevyemmät aineet, kuten rasva nousevat pinnalle. Raskaammat aineet, kuten hiekka, sora ja kivet laskeutuvan altaan pohjalle. Mekaanisen puhdistuksen viimeiset vaiheet ovat esi-ilmastus ja esiselkeytys. Esi-ilmastuksella pyritään muuan muassa kasvattamaan jäteveden happipitoisuutta ja nopeuttamaan saostuskemikaalien sekoittumista veteen. Näin saadaan myös jäteveden laatua tasoitettua. Eli mekaanisella puhdistuksella pyritään poistamaan jätevedestä haitalliset aineet ja esineet, jotka voivat sekä rikkoa että aiheuttaa haittaa seuraavissa puhdistusvaiheissa. [9.]

Jäteveden puhdistuksen seuraava vaihe on biologinen puhdistus. Biologisessa puhdistusprosessissa käytetään hyväksi jätevedessä olevia mikrobeja aktiivilietemenetelmän avulla. Biologinen puhdistus alkaa ilmastusaltaassa, jossa jäteveeteen lisätään aktiivilietettä eli mikrobeja sisältävää biomassaa. Altaassa ilmastuslaitteiden avulla mikrobit saavat riittävästi happea pysyäkseen hengissä. Mikrobit käyttävät jätevedessä olevat epäpuhtaudet, esimerkiksi orgaanista ainetta, fosforia ja typpeä, aineenvaihduntaansa ja lisääntyäkseen. Mikrobien lisääntyessä ne muuttavat jätevedessä olevat liuenneet epäpuhtaudet hiilidioksidiksi, vedeksi ja mikrobeiksi. Tämä johtaa siihen, että ravinteiden määrä vähenee, kun taas mikrobien määrää lisääntyy. Tämä jätevesi, joka sisältää enemmän mikrobeja kuin liuenneita aineita, johdetaan laskeutusaltaaseen. Laskeutusaltaassa mikrobit vajoavat altaan pohjalle, jättäen puhdistetun veden altaan päälle. Seuraavaksi puhdistettu vesi johdotetaan jälkiselkeyteen. [9; 12.]

Jäteveden kemiallisella puhdistuksella pyritään poistamaan jätevedestä epäorgaanista fosforia, joka on peräisin esimerkiksi ruoasta tai pesuaineista. Kemiallisessa puhdistuksessa jäteveeteen lisätään kemikaaleja, esimerkiksi alumiini-, rauta- tai kalsiumsuoloja, jotka reagoivat jätevedessä liunneen fosfaatin kanssa. Näin aineet joko saostuvat vaahdoksi pinnalle tai laskeutuvat altaan pohjalle. Altaan yläpuolella olevaa puhdistettua vettä siirretään seuraavaksi jälkiselkeyteen. [13.]

Biologisen ja kemiallisen puhdistusprosessin viimeisissä vaiheissa puhdistettu vesi on johdettu jälkiselkeytysaltaaseen. Tässä vaiheessa vesi on jo melkein kirkas, mutta jälkikäsittelyllä pyritään parantamaan veden laatua vielä enemmän. Jälkikäsittelyllä vedestä poistetaan hiekkasuodattimilla tai biologisilla suodattimilla epäpuhtaukset. Tämän vaiheen jälkeen puhdistettua vettä voi laskea vesistöihin. [9.]

Jäteveden puhdistusprosessin myötä syntyy jätevesilietettä. Jätevesilietettä voidaan käsitellä monella eri tavalla, esimerkiksi biologisesti. Biologisesti lietettä voidaan käsitellä joko kompostoimalla tai mädättämällä. Jos halutaan kompostoida lietettä, sitä pitää kuivattaa. Tämän takia lietteeseen lisätään turvetta tai haketta, jotta lietteen kuiva-ainepitoisuus saadaan kompostoinnille sopivaksi. Lietettä voi kompostoida joko avoauimoissa kentällä tai suljetussa tilassa, kunhan varmistaa lietteen ilmaan saantia. Lietettä voidaan mädättää lämpötilan mukaan mesofiilisesti tai termofiilisesti. Mädätyksen myötä syntyy biokaasua, jota voidaan käyttää esimerkiksi biopoltoaineena tai sähköenergian ja lämmön tuottamiseen. [14]

6 Jäteveden käsittely ultraäänellä

Kaikki ihmiset käyttävät päivittäin vettä elämän ja hyvän terveyden ylläpitämiseksi, joten veden saanti ja veden laatu ovat elintärkeitä. Veden laadun on täytettävä tiettyjä standardeja. Veden laatu määräytyy monien tekijöiden, kuten fysikaalisten, kemiallisten tai biologisten parametrien perusteella. [15.]

Juomaveden ja jäteveden puhdistuksen suurin haaste ovat suuret kustannukset ja myös kemikaalien käyttö. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on tehty paljon tutkimuksia. Yksi innovatiivisista tekniikoista, joita käytetään vedenkäsittelyprosessin parantamiseksi, on ultraäänien käyttö. Tässä opinnäytetyössä esitetään erilaisia ultraääniteknologian sovelluksia vedenkäsittelyprosessissa. Eri tutkimukset ovat osoittaneet, että tämä tekniikka voi parantaa veden käsittelyprosessia ympäristöystävällisesti. [15.]

6.1 Ultraäänen käyttö membraanisuodatuksessa

Membraanisuodatusta käytetään esimerkiksi jäteveden- ja juomaveden puhdistuksessa sekä sellu- ja paperiteollisuudessa. Membraanisuodatusprosessin vahvuudet ovat suuri erotustehokkuus, alhainen energiankulutus ja yksinkertaiset prosessilaitteet. Membraaneja valmistetaan synteettisistä polymeereistä tai epäorgaanisista materiaaleista. Kuitenkin usein membraanit ovat synteettisistä polymeereistä, esimerkiksi polyeetterisulfonista, polysulfonista tai regeneroidusta selluloosasta, valmistettuja joustavia filmejä, joilla on erittäin hyvä läpäisevyys katkaisukokoa pienemmille molekyyleille. [16.]

Yleensä monenlaisissa vedenpuhdistusprosesseissa sovelletaan paine-eroon perustuvia membraanisuodatusmenetelmiä, kuten mikro-, ultra- ja nanosuodatus sekä käänteisosmoosi. Hyödynnetty suodatusmenetelmä vaihtelee erotettavien komponenttien koosta riippuen. Taulukossa 1 on esitetty usein käytetyt huokoskoot ja suodatuspaineet. [16.]

Taulukko 1. Suodatustekniikoissa käytettyjen membraanihuokoskoot ja suodatuspaineet. [16.]

Suodatusmenetelmä	Membranin huokoskoko	Suodatuspainealue
Mikrosuodatus (MF)	0,04 – 0,4 µm	0–2 bar
Ultrasuodatus (UF)	0,001 – 0,04 µm	0,2–10 bar
Nanosuodatus (NF)	< 0,001 µm	5–40 bar
Käänteisosmoosi (RO)	~ 0,0001 µm	8–100 bar

Membraanisuodatuksella saa jätevesiä puhdistettua hyvin, eikä tarvita hiekkasuodatusta, jälkiselkeytystä tai UV-desinfiointia. Membraanisuodatustekniikalla saa poistettua taudinaiheuttajat. [17.]

Tämän tekniikan huono puoli on suodatuskalvon likaantuminen. Kalvon pinnalle muodostuu likakerros, johon jäävät liuenneet aineet tai hiukkaset, kuten orgaaniset aineet, piidioksidi, rautaoksidi, kalsiitti ja savet. Kalvon pinnalle kerrostunut lika heikentää kalvon suorituskykyä. Kalvon likaantuminen vaikuttaa veden laatuun ja lian takia kalvon käyttöikä on lyhyt. Likaantuminen jaetaan neljään ryhmään: [18.]

- kolloidinen (savet, flokit)
- biologinen (bakteerit, sienet)
- orgaaninen (öljyt, polyelektrolyytit, humus)
- skaalautuminen (mineraalisaostumat).

Kalvoja voi puhdistaa kemiallisesti tai fysikaalisesti. Kemiallisen puhdistuksen huono puoli ovat suuret kustannukset ja jätekemikaalien hävittäminen. Mekaaninen puhdistus, esimerkiksi toistuva huuhtelu, vahingoittaa kalvoa. Molemmissa puhdistusmenetelmissä suodatusprosessi on pysäytettävä puhdistuksen ajaksi. Näiden ongelmien takia ultraäänipuhdistus on osoittautunut tehokkaaksi kalvojen puhdistuksessa. [18.]

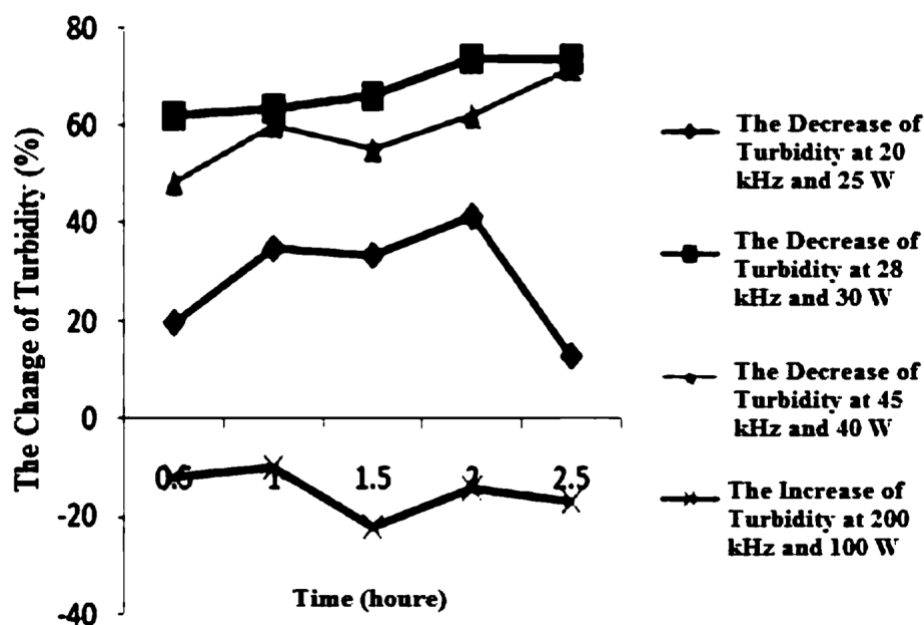
Kavitaatioilmiössä muodostuu radikaaleja ja kuplien romahduksista seuraa iskuja, jotka estävät partikkelien kerrostumista. Kavitaation avulla voidaan irrottaa hiukkasia kalvopinnoista. Desinfiointia voi parantaa vetyperoksidin ja hydroksyyliiradikaalien avulla. Ultraäänitaajuuudet 70 – 620 kHz voivat puhdistaa kalvoja vahingoittamatta niitä. Ultraäänellä suodatus on parantunut jopa 200 %, kun ultraäänen intensiteetti on ollut 5 W/cm². Puhdistuksia on tehty myös 40 kHz:n taajuudella ja 500 W:n teholla. Hyviä puhdistustuloksia on saatu myös 20 kHz:n ja 28 kHz:n taajuudella. Ultraääni parantaa membraanisuoatusta ja pitää suodatuskalvot puhtaana. [18.]

6.2 Ultraäänen käyttö sameuden vähentämiseksi

Sameus on veden fyysinen ominaisuus. Se johtuu suspendoituneista aineista tai liuenneista aineista, kuten savesta, lietteestä, epäorgaanisista ja orgaanisista aineista ja planktonista. Tavanomaiset menetelmät sameuden vähentämiseksi vedenkäsittelyprosessissa ovat nopea ja hidas suodatus, mikro-suodatus, ultrasuodatus ja flokkulointi. [18.]

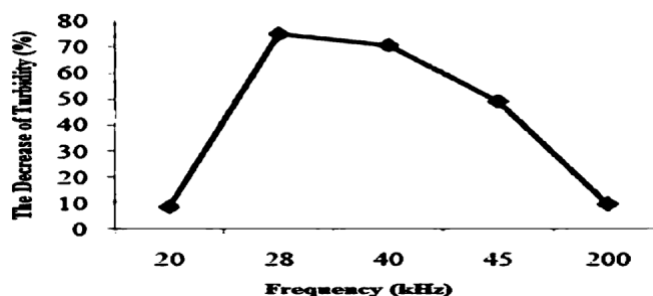
Viime vuosina on tehty paljon tutkimuksia ultraäänen soveltuvuudesta sameuden vähentämiseen vedenpuhdistuksissa. Lämpötilan ja paineen vaihtelun ja radikaalien muodostumisen aiheuttamat kemialliset ilmiöt voivat vaikuttaa partikkelien aggregoitumiseen. Tutkimuksia on tehty 20 kHz:n (25 W), 28 kHz:n (30 W), 45 kHz:n (40 W) ja 200 kHz:n (100 W) taajuuksilla. Sonikointiaikoina käytettiin 0,5; 1; 1,5; 2 ja 2,5

tuntia. Seuraavassa kuvassa 7 nähdään, miten eri sonokointiajat, tehot ja taajuudet ovat vaikuttaneet veden sameuteen. Tehokkain yhdistelmä on ollut 28 kHz 30 W:n teholla. Kuvassa 7 on esitetty sameuden muutosta ajan funktiona. [18]



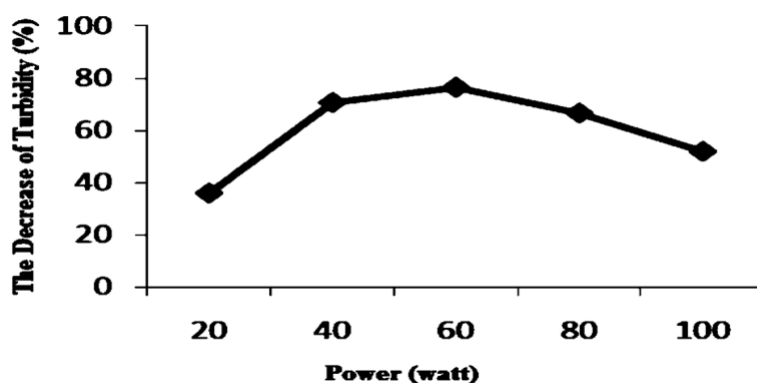
Kuva 7. Sameuden muutos ajan funktiona. Kuvasta nähdään, että 28 kHz ja 30 W on tehonnut eniten. Tämä taajuus ja teho ovat muuttaneet sameutta melkein 70 %. Samoihin tuloksiin päästiin myös 45 kHz:n ja 40 W:n arvoilla. Suuret taajuudet, kuten 200 kHz, eivät tehoa ollenkaan. [18.]

Seuraavassa kuvassa 8 näkyy, miten eri taajuudet ovat vaikuttaneet veden sameuteen. Paras vaihtoehto taajuuksista on ollut 28 kHz. Sameuden muutokset pienenevät tätä suuremmilla ja pienemmilla taajuuksilla. [18.]



Kuva 8. Sameuden muutos taajuuden funktiona. Tehokkain taajuus on 28 kHz 40 W:n teholla ja 1 tunnin ultraäänen ajolla. [18.]

Seuraavassa kuvassa 9 nähdään, miten teho vaikuttaa sameuden muutokseen. Tässä tutkimuksessa näkyy, että paras vaihtoehto teholle on 60 W ja huonoin 20 W. Sameuden muutokset pienenevät tehon kasvaessa yli 60 W. Tehon vaikutukset on tutkittu 28 kHz:n taajuudella 1 tunnin ajolla. 28 kHz:n taajuudella sameus vähenee eniten, jopa 76 %. [18.]



Kuva 9. Sameuden muutos tehon funktiona. Muutos on suurin, kun teho on 60 W. [18]

Lukuisia tutkimuksia on tehty optimaalisen taajuuden ja tehon löytämiseksi sameuden vähentämiseen. Monet taajuudet ja tehot ovat vähentäneet sameutta, mutta vaikutus ei ole ollut stabiili. Paras tulos on saatu 40 kHz:n taajuudella ja 60 W:n teholla. Veden sameus on vähentynyt 10,3 NTU:sta jopa 1,48 NTU:hun. [9] NTU (Nephelometric Turbidity Unit) on sameuden yksikkö. [19.]

6.3 Levien poisto jätevedestä ultraäänen avulla

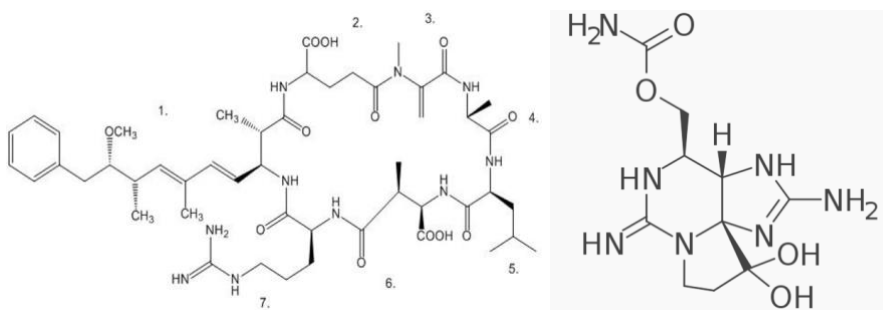
Levien kasvu on yleinen ongelma vedenpuhdistamoissa ja vesivarastoissa. Levät ovat vesieliöitä, jotka voivat kasvaa yli 30 metrin mittaisiksi. Rakenteeltaan levät ovat joko sekovartaisia, yksisoluisia tai rihmamaisia. Levät voivat elää makeassa vedessä, meressä ja kosteassa maassa. Tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat levien kasvuun, ovat lämpötila ja valo. [20.]

On olemassa erilaisia menetelmiä levien kontrolloimiseksi ja poistamiseksi vedestä, kuten vaahdotus, hapetusprosessit, otsonaatio ja flokkulointi kuparisulfaattilla. [18.]

Uusi tekniikka levien kasvun kontrolloimiseksi ja poistamiseksi on ultraääni. Kavitaatio-ilmion seurauksena korkea lämpötila ja paine sekä syntyneet radikaalit voivat tuhota leviä. Lisäksi epästabiili kavitaatio tuottaa erittäin reaktiivisia hydroksyyli-radikaaleja, jotka voivat vaikuttaa orgaanisiin materiaaleihin/aineisiin. [18.]

Tutkimus on tehty 42 kHz:n taajuudella ja sonikointiajoille 30, 60, 90, 120 ja 150 minuuttia. Levät tuhoutuivat 8-, 55-, 67-, 90- ja 100-prosenttisesti. Toisessa tutkimuksessa on osoitettu ultraäänien tuhoavan syanobakteereja. Kavitaation avulla bakteerien lukumäärät laskivat 40 %:sta 18 %:iin. [18.]

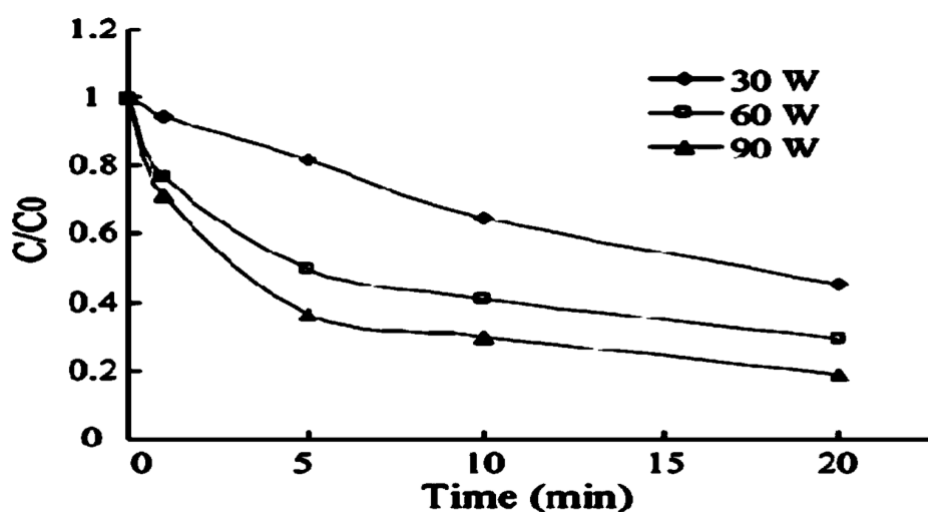
Sinilevät järvessä voivat sisältää mikrokystiiniä. Mikrokystiinit ovat vaarallisia myrkyjä ihmisen elimistölle. Ne estävät proteiineja sitoutumasta normaalisti ja täten estävät proteiiniin toiminnan elimistössä kokonaan. Seuraavassa kuvassa 10 on esitetty mikrokystiinin ja saksitoksiinin kemialliset koostumukset. [18.]



Kuva 10. Sinilevät voivat sisältää myrkyjä esimerkiksi mikrokystiinejä (vasemmalla) ja saksitoksiinia. [18.]

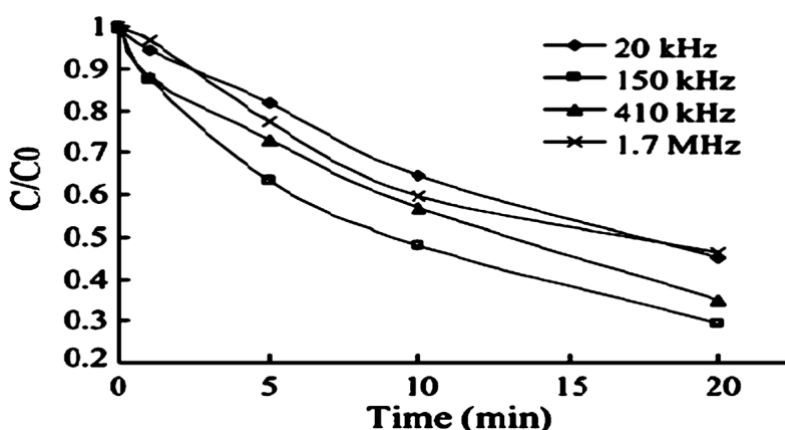
Mikrokystiinin hajoamista ultraäänien vaikutuksesta on tutkittu. Tutkimusten tulokset ovat osoittaneet, että mikrokystiiniä on pystytty hajottamaan ultraäänellä käyttämällä 20 kHz:n taajuutta 120 minuutin ajan. Mikrokystiiniä on pystytty hajottamaan myös 67 % 28 kHz:n taajuudella ja 20 W:n teholla. [18.]

Parhaaseen ja stabiileimpaan tulokseen päästään, jos yhdistetään ultraääni ja koagulointi. Koagulointimenetelmällä voi puhdistaa jäteveden lietettä. [13] On havaittu, että koagulantin tehokkuus nousee 35 prosentista 67 prosenttiin ultraäänen intensiteetillä $47,2 \text{ W/cm}^2$. Tällä yhdistelmällä on saatu tuhoutumaan 93 prosenttia mikrokystiinistä. Seuraavassa kuvassa on esitetty, miten tehon nostaminen vaikuttaa mikrokystiinin pitoisuuteen. Tutkimus on tehty kolmella eri teholla ja 20 kHz:n taajuudella, niiden vaikutukset on esitetty kuvassa 11. [18.]



Kuva 11. Mikrokystiinin pitoisuus ajan funktiona kolmella eri teholla. [18.]

Suurin teho oli 90 W, ja tällä teholla mikrokystiinin määrä on laskenut noin 20 prosenttiin. Tehon lisäksi taajuus vaikuttaa myös merkittävästi mikrokystiinin pitoisuuden vähentämisessä. Tutkimuksia on tehty 20 kHz:n ja 1,7 MHz:n välillä. Seuraavasta kuvasta nähdään, mikä oli optimaalinen taajuus mikrokystiinin pitoisuuden vähentämiseksi. [18.]



Kuva 12. Mikrokystiinien pitoisuus ajan funktiona eri taajuuksilla. [18.]

Kaikilla taajuuksilla on saatu mikrokystiinien pitoisuutta laskemaan, mutta optimaalisin taajuus oli 150 kHz. Tällä taajuudella myrkyin pitoisuus väheni 70 %. Mikrokystiinien pitoisuuden väheneminen saavutetaan myös 20 kHz:n taajuudella, 90 W:n teholla ja 20 minuutin ajolla. Mikrokystiinien poistoon vaikuttavat kolme muuttujaa eli taajuus, teho ja sonokointiaika. [18.]

6.4 Lietteen käsittely ultraäänellä

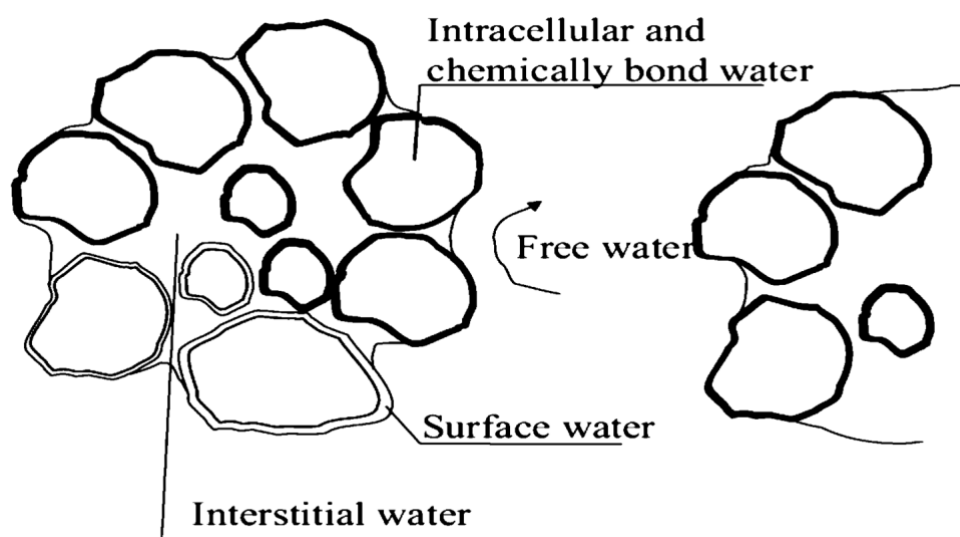
Jäteveden käsittelyprosessissa muodostuu runsaasti kemiallista ja biologista lietettä. Lietettä voi stabiloida, kompostoida, tiivistää ja kuivata. Tällä hetkellä lietteen käsittelyssä on monia merkittäviä teknisiä haasteita ja noin 50 % vedenpuhdistuksen investoinneista ja käyttökustannuksesta liittyy lietteen käsittelyyn. Lietteiden vedenpoisto vähentää siirto- ja hävittämiskustannuksia. Tyypillisiä vedenpoistomenetelmiä ovat suodatus, sentrifugointi ja lietteiden kuivaus. Polyelektrolyytin lisääminen lietteeseen on tällä hetkellä eniten käytetty jätevedenpuhdistamojen esikäsittely. Polyelektrolyytin lisääminen kuitenkin lisää kustannuksia ja aiheuttaa ympäristön saastumista. Polyelektrolyytti on yhdiste, jota hyödynnetään dispergoituneen aineen höytälöittämiseen laskeuttamisen edistämiseksi. [21.]

Lietettä muodostuu eri käsittelyvaiheissa, kuten kemiallisessa, mekaanisessa ja biologisessa vaiheessa. Mekaanisessa käsittelyssä laskeutuvista hiukkasista niin sanottu raakaliete muodostuu esiselkeytymisvaiheessa. Raakalietteessä on hiekkaa, ruuantähteitä ja ulostetta. Kemiallisessa käsittelyssä muodostunut liete sisältää esimerkiksi fosfaattia, karbonaattisakkaa ja eloperäistä ainetta. Biologisessa käsittelyssä lietteessä muodostuu kuolleita ja eläviä mikrobeja. Liete koostuu 95-prosenttisesti vapaasta ja sidotusta vedestä. [21.]

Jätevedenpuhdistamossa syntyvän lietteen pääkomponentti on vesi, jota on 95 – 99 prosenttia. Lietteän koostumus riippuu jäteveden koostumuksesta ja jäteveden käsittelyolosuhteista, kuten lietteän iästä. Lietehiutaaleet koostuvat pienistä primaarihiukkasista (2 µm), pienistä flokeista (13 µm) ja huokoisista flokeista (100 µm). [21.]

Lietteän vesipitoisuus on jaettu kahteen luokkaan: vapaa vesi ja sidottu vesi. Vapaa vesi saadaan poistettua lietteestä helposti erilaisilla mekanismeilla. Vapaa vesi käyttäytyy termodynaamisesti kuin puhdas vesi. Sitoutunut vesi on tiiviisti sidottu flokkiin lietteän hiukkasten välillä, eikä sitä voida poistaa mekaanisilla prosesseilla. Sidotulla vedellä on erilainen kemiallinen potentiaali verrattuna vapaaseen veteen, ja se toimii termodynaamisesti eri tavalla kuin vapaa vesi. [22.]

Lietteän vesifaasi voidaan jakaa neljän ryhmään: vapaa vesi, interstitiaalinen vesi, pinnan kosteus ja sidottu kosteus. Vapaa vesi on vettä, joka ei ole sitoutunut lietteän kiintoaineisiin, ja sitä voidaan helposti erottaa prosessista. Interstitiaalinen vesi jää kiinni lietteän flokkiin. Interstitiaalinen vesi voidaan poistaa rikkomalla flokin rakennetta. Pintakosteus on kiinteän hiukkasen pinnalla, eikä sitä voida poistaa mekaanisesti. Sitoutunut kosteus on kemiallisesti sidottu lietteän kiintoaineisiin. Sitoutunut kosteus on hankalin poistaa. Vapaa vesi on sitoutunut lietteeseen fysikaalisesti, ja sitä voidaan poistaa mekaanisesti. Kemiallisesti sitoutunut vesi voidaan poistaa vain lämpökuivaamalla yli 105 asteessa. Seuraavassa kuvassa 13 on esitetty lietteeseen sitoutuneet veden muodot. [22.]



Kuva 13. Lietteen vesipitoisuus voidaan jakaa neljään pääryhmän: vapaa vesi, kemiallisesti sitoutunut vesi, interstitiaalinen vesi ja kiinteän aineen pinnalle muodostunut vesi. [22.]

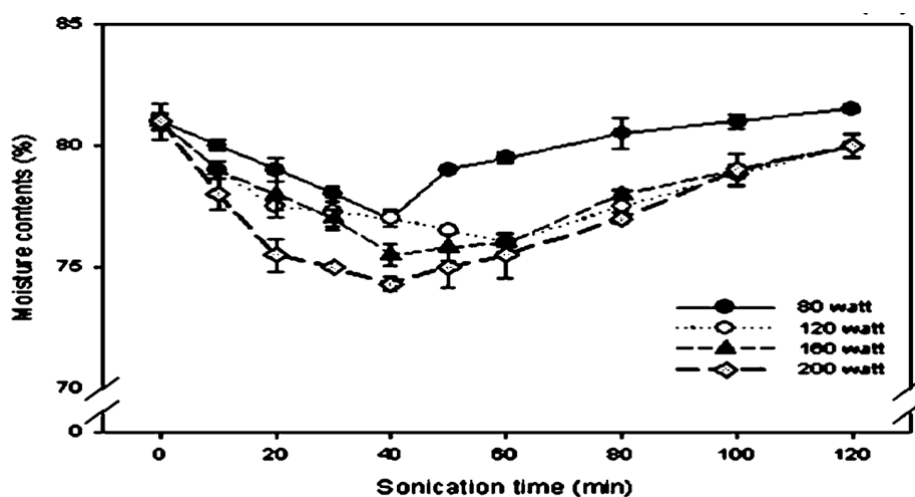
Lietteen hävittäminen on vaikeaa monilla jätevedenkäsittelylaitoksilla. Viime vuosina on tutkittu erilaisia prosesseja lietteen tuotannon vähentämiseksi. Yksi tapa vähentää lietteen määrää on ultraäänen käyttö. Ultraääni hajotti erityisesti suuria ja hauraita alkueläinsoluja, jotka sisälsivät paljon sidottua vettä, näin soluihin sitoutunut vesi vapautuu. Vapautettu vesi voidaan sitten poistaa esimerkiksi perinteisesti suodattamalla tai sentrifugoimalla. [22.]

Ultraäänikentän aiheuttamasta kavitaatiosta muodostunut kuplan romahdus aiheuttaa sen, että lietteen partikkelien rakenteet muuttuvat tai rikkoutuvat. Jopa pieni teho riittää vapauttamaan vettä, joka on sitoutunut lietteeseen interstitiaalisesti. Monet parametrit vaikuttavat kavitaation muodostumiseen ja lietteen hajoamiseen, kuten esimerkiksi ultraäänen taajuus ja teho, sonikointiaika, lietteen pitoisuus ja lämpötila. [18.]

Runsaasti tutkimuksia on tehty määrittämään ultraäänen optimaalinen teho ja taajuus kiintoaineen poistossa jätevedestä. Tutkimuksissa on osoitettu, että sonikointiaika on yksi tärkeimmistä muuttujista hyvän tuloksen kannalta. [18.]

Ultraäänikentän tehon vaikutuksesta lietteen rakenteen muutokseen on ristiriitaisia tuloksia. Joissakin tutkimuksissa on osoitettu, että suuri teho vaikuttaa rakenteen muutokseen eniten ja toisissa tutkimuksissa todetaan tehon nostamisen jossain määrin vaikuttavan rakenteen muutokseen. Jossain tutkimuksessa todetaan, että lietteen rakenteeseen voidaan vaikuttaa enemmän ultraäänikäsittelyn kestolla kuin teholla. Lietteän käsittelyssä rakenteen muuttamiseksi optimaalisin tulos saavutetaan, kun teho on matala ja sonikointiaika on pitkä. [18.]

Seuraavassa kuvassa 14 on esitetty, kuinka paljon tehon nostaminen vaikuttaa kiintoaineen pitoisuuden pienentämisessä. Suurimmat tehot poistivat kosteutta parhaiten. Tehon nostaminen vaikuttaa jossain määrin, mutta ei kovin paljon. [18.]



Kuva 14. Lietteän vesipitoisuus ajan funktiona minuuteissa. [18.]

Toisessa tutkimuksessa osoitetaan, että korkeampi ultraääniteho ja pitkä sonikointiaika vaikuttavat lietteän rakenteeseen eniten. Tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 2. [23.]

Taulukko 2. Tehon vaikutus lietteen rakenteeseen. Tehon nostaminen on pienentänyt solujen kokoja. [23.]

Time min	Specific energy kJ/kg DS	Energy kWh/m ³	dT °C	D ₅₀ µm	CST s
0	0	0	0	76	16
1	280	3	3	72	38
5	1 400	17	10	48	100
20	5 600	67	26	18	470

Seuraavassa kuvassa 15 nähdään, että ultraäänellä on saatu rikottua lietteen soluja. Ensimmäisessä kuvassa ei ole käytetty ultraääntä ja solut ovat ehjiä. Toisessa kuvassa ultraääni on ollut päällä yhden minuutin. Kolmannessa kuvassa ultraääni on ollut päällä 20 minuuttia. [23.]



No US-treatment

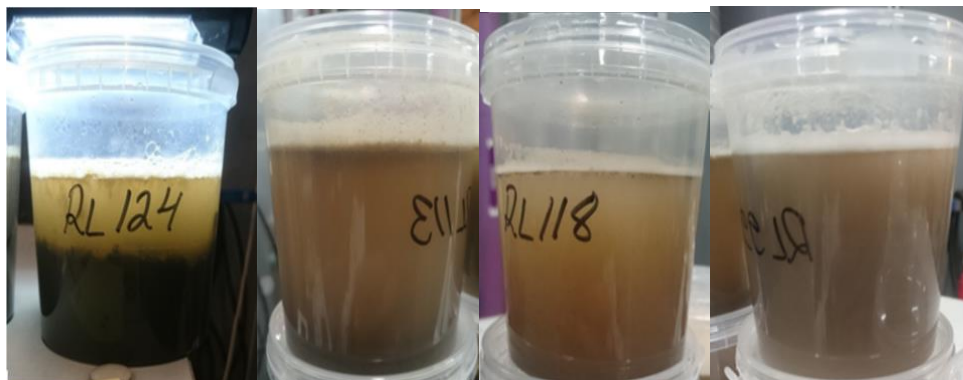
1 min US-treated

20 min US-treated

Kuva 15. Vasemmassa kuvassa ultraääntä ei ole käytetty. Keskellä olevassa kuvassa ultraääni on ollut päällä yhden minuuttin. Viimeisessä kuvassa ultraääni on ollut päällä 20 minuuttia. [23.]

Suomessa tätä aihetta on tutkittu Altum Technologies Oy:ssä. Tavoitteena oli saada tehoultraäänellä lietteen soluseinämiä rikottua ennen polymerisointikäsittelyä lingon jälkeisen tuotteen sidotun veden vapauttamiseksi. Alustavat tulokset olivat varsin lupaavia. Seuraavassa kuvassa 16 esitetään tuloksia laboratoriokokeen eri vaiheista. Vasemmassa purkissa on liete, jossa sonikointia ei ole vielä tehty. Seuraavista kuvista

oikealla nähdään, miten tehon nostaminen ja sonokemiallisen käsittelyn kesto ovat vaikuttaneet lietteen rakenteeseen. Viimeisessä kuvassa lähes kaikki lietteen rakenteet ovat tuhoutuneet ja näihin sitoutunut vesi on vapautunut. [3.]



Kuva 16. Laboratoriokokeiden tulokset. Vasemmalla sonikointia ei ole tapahtunut. Viimeisessä kuvassa kiintoaineesta on vapautunut lähes kaikki vesi. [3.]

Lietteen solurakenteen rikkominen ultraäänen avulla on mahdollista. Laboratoriokokeiden tulokset ovat kuitenkin vähän ristiriitaisia. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta löydetään optimaalinen taajuus, teho ja sonikointiaika. [23.]

6.5 Ultraäänen käyttö veden desinfiointiprosessissa

On ennustettu, että maapallon väestön massiivisen kasvun vuoksi vedestä tulee suuri pula tulevaisuudessa. Saastuneilla ja käsittelemättömillä vesillä on suuri terveysriski. Vaikka jätevedenkäsittelyssä on tapahtunut suurta edistystä, vedestä aiheutuneet taudit ovat edelleen merkittävä maailmanlaajuinen uhka kansanterveydelle. Vuodessa 250 miljoonaa ihmistä sairastuu ja 10–20 miljoonaa ihmistä kuolee likaisen veden takia. Monet näistä infektioista ilmenevät kehitysmaissa, joissa kansanterveyttä koskeva tietoisuus on alhaisempi kuin kehittyneemmissä maissa. Kuitenkin likaisesta vedestä aiheutuvien tautien esiintyvyys myös Yhdysvalloissa on lisääntynyt viimeisten 20 vuoden aikana. [15.]

Jätevesistä aiheutuvat terveysriskit ihmisille johtuvat patogeenisistä mikrobeista, myrkyllisistä kemikaaleista ja raskasmetalleista. Patogeeniset mikrobit, jotka ovat jätevedessä, voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään. Nämä ryhmät ovat virukset, bakteerit ja patogeeniset alkueläimet. Suurin osa näistä taudinaiheuttajasta ovat peräisin ulosteesta. Esimerkkejä erilaisista mikrobien patogeeneistä on esitetty taulukossa 3. [15.]

Taulukko 3. Esimerkkejä käsittelemättömistä jätevesistä havaituista patogeenisistä mikrobeista. Jätevedessä on ollut eniten adenovirus ja *E. coli* -bakteereita. [15.]

Microbial type	Major disease(s) [¶]	Concentration in wastewaters	Infectious dose [†]
Viruses			
Enteroviruses			
Poliovirus	Poliomyelitis		
Enterovirus	Gastroenteritis, heart anomalies, meningitis		
Echovirus			
Coxsackievirus			
Hepatitis A virus [§]	Hepatitis		
Adenovirus	Respiratory disease, conjunctivitis	Medium to High	Low
Reovirus	Not clearly established		
Calicivirus			
Norwalk agent	Gastroenteritis, diarrhoea, vomiting, fever		
SSRV			
Rotavirus	Gastroenteritis		
Astrovirus	Gastroenteritis		
Bacteria			
<i>Vibrio cholerae</i>	Cholera		High
<i>Salmonella typhi</i>	Typhoid, Salmonellosis		High
Enteropathogenic <i>E. coli</i>	Gastroenteritis	Medium to High	High
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis		High
<i>Shigella dysenteriae</i>	Dysentery		Low
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis		High

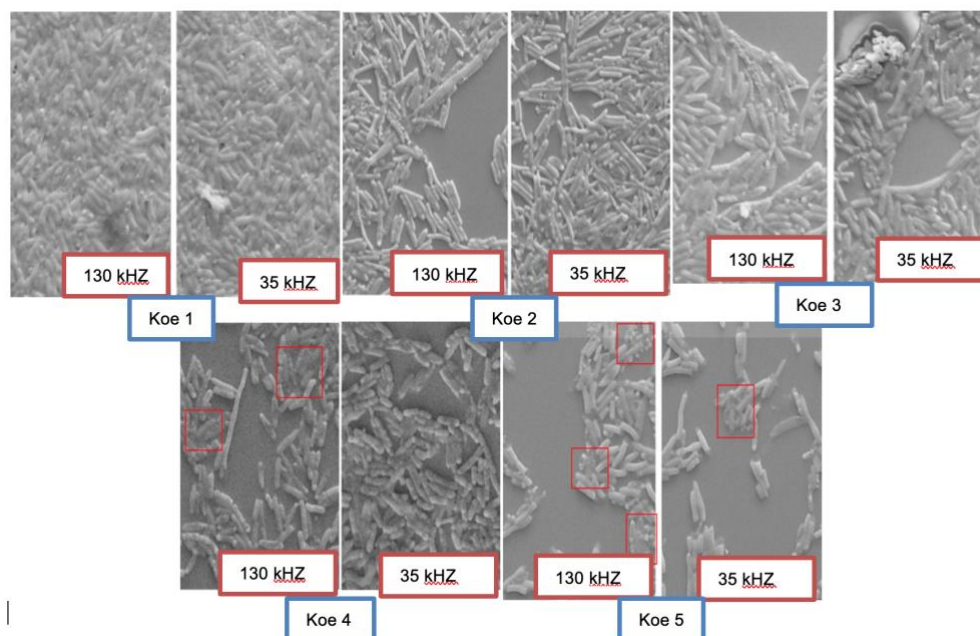
Jätevedenpuhdistuksen tärkeä tehtävä on estää ihmisille ja luonnolle haitallisten aineiden pääsy luontoon. Suolistoperäiset bakteerit ja kemikaali- ja puhdistusainejäämät ovat luonnolle haitallisia aineita. Bakteerit ovat yleisimpiä jätevesien patogeenisistä mikrobeista. [24.]

Veden desinfiointiprosessissa käytetään ultraviolettivaloa ja kemiallisia aineita, kuten klooria, hypokloriittia, klooriamiinia, klooridioksidia ja bromia.

Vedenkäsittelyteollisuudessa halutaan kehittää ja käyttää ympäristöystävällisempiä tekniikoita, joiden avulla kemikaalien vaikutus vesistöihin on vähäisempää. Siksi monet tutkijat selvittävät ultraäänen hyödyntämistä desinfiointimenetelmänä. Koska ultraäänen käyttö on fysikaalinen prosessi, siitä ei synny toissijaisia myrkyllisiä yhdisteitä. [18.]

Ultraäänen tapauksessa puhdistuksen mahdollistaa tässäkin tapauksessa kavitaatio. Kavitaation avulla muodostetut radikaalit ovat hyvin reaktiivisia ja hyökkäävät jätevesien kemikaaleihin. Kavitaatiokuplan romahduksesta vapautuu suuri paine ja lämpötila, ja tämä aiheuttaa solukuolemia. Mikrovirtaus on ultraääniaaltojen aiheuttamaa veden virtausta. Mikrovirtaus muodostuu, kun kavitaatiokupla oskilloi kasvaessaan. Mikrovirtaus vahingoittaa bakteerisoluja. Ultraäänen vaikutuksesta solukalvot repeytyvät, kemialliset hapettimet voivat diffundoitua soluun ja tuhota mikro-organismien rakenteet. [18.]

Yleinen bakteeri jätevedessä on *Escherichia coli*. Tutkimuksissa on pyritty määrittämään optimaalinen taajuus, sonikointiaika ja teho, joilla tuhoetaan *E.colia*. Seuraavassa kuvassa 17 nähdään, kuinka paljon *E. coli* -bakteeri on tuhoutunut käyttämällä 35 kHz:n ja 130 kHz:n taajuuksia ja 250 W:n tehoa. Kokeessa 1 sonikointia ei ole vielä aloitettu, kokeessa 2 sonikointiaika on ollut 5 minuuttia, kokeessa 3 aika oli 10 minuuttia, kokeessa 4 aika oli 20 minuuttia ja kokeessa 5 aika oli 30 minuuttia. Tuloksista nähdään, että *E.colin* solut vähenevät käsittelyajan pidentyessä. 130 kHz:n taajuus oli optimaalisempi kuin 35 kHz. Punaiset laatikot osoittavat rikkoutuneita soluja. [25.]



Kuva 17. *E.colin* solujen kuolema. Kokeessa 1 sonikointi ei ole vielä alkanut ja kokeessa 5 aikaa kulunut 30 minuuttia, soluja on kuollut ja bakteria on jäljellä vain vähän. [25.]

E.colin solujen kuolemaa on tutkittu myös muilla taajuuksilla ja tehoilla. On osoitettu, että solujen kuolema lisääntyy, jos käytetään lisäaineina TiO_2 tai H_2O_2 . Radikaaleista syntyy vetyperoksidia, mutta jos syntyvä määrä ei ole riittävä, nesteeseen voidaan myös lisätä vetyperoksidia. Seuraavassa taulukossa on esitetty tuloksia muilla taajuuksilla ja tehoilla. Taulukossa 4 on myös esitetty, miten TiO_2 tai H_2O_2 auttoivat prosessissa. [25.]

Taulukko 4. *E. coli*-bakteeri solujen tuhoutuminen eri taajuuksilla ja tehoilla. [25.]

Disinfection process	Inactive Microorganism	Operation Condition	Irradiation Time(min)	Removal Efficiency (%)	Reference
US	Cryptosporidium parvum oocysts	1 MHz, 4.1 W	2, 4	87.8, 94.02 respectively	Olvera et al., 2008
US	<i>E. coli</i>	24 kHz, 160 W	120	92.3	Paleologou et al., 2007
US +25-50 mg/l H_2O_2	<i>E. coli</i>	24 kHz, 160 W	120	99.99	Paleologou et al., 2007
US	<i>E. coli</i>	42 kHz, 70W	1, 15, 30, 45, 60, 75, 90	0, 78.3, 87, 98.0, 99.6, 99.7, 99.80	Dehghani, 2005
US	<i>E. coli</i> XL1-Blue	27.5kHz, 42 W/ml	3	99	Furuta et al., 2004
US + 1mg/l TiO_2	<i>E. coli</i>	39 KHz, 200 w	30	98	Dadjour et al., 2005
US + Electrolysis	Klebsiella pneumonia	40 kHz	15	100	Joyce et al., 2003
US	<i>B. subtilis</i>	27 kHz, 300 W	60	96	Mason et al., 2003

Tehokkain taajuus *E.coli*-bakteerin tuhoamiseen oli 135 kHz 250 W:n teholla. Pelkästään ultraäänen avulla saadaan tapettua melkein kaikki bakteerit eli 99 prosenttia käyttämällä 27,5 kHz:n taajuutta. Bakteerit saadaan kokonaan tuhoutumaan, kun käytetään ultraäänen lisäksi vetyperoksidia. Tutkimusten tärkein tulos oli, että ultraääntä voi käyttää myös desinfiointimenetelmänä vaikkakin tulokset olivat vähän ristiriitaisia. [25.]

7 Yhteenveto

Jäteveden puhdistaminen on hankala prosessi. Jätevedenpuhdistuksen suurin haaste ovat suuret kustannukset ja myös kemikaalien käyttö. Viime vuosina on tutkittu uusia prosesseja ja menetelmiä jäteveden puhdistamishaasteiden ratkaisemiseksi. Tutkimukset ovat osoittaneet, että tehoultraääni on potentiaalinen valinta vedenkäsittelyprosessin parantamiseksi.

Jäteveden yleinen käsittely koostuu useista vaiheista, kuten kiintoaineiden ja mikrobien poistosta. Kiintoaineita poistetaan yleensä kalvoprosessissa. Jäteveden puhdistuksen seuraava vaihe on biologinen puhdistus. Biologisessa puhdistuksessa poistetaan jätevedestä fosforia ja typpeä. Biologisen puhdistuksen jälkeen on vuorossa kemiallinen puhdistus. Jäteveden kemiallisella puhdistuksella pyritään poistamaan jätevedestä liuenneen fosfaattia.

Tehoultraäänellä saadaan nesteessä aikaan kavitaatiota, jota voidaan hyödyntää jäteveden puhdistuksen sonokemiallisissa prosesseissa. Kavitaation aikana nesteeseen muodostuu kuplia ja kuplien romahduksesta seuraa paikallisesti korkea lämpötila ja paine. Kuplan romahduksen aikana muodostuu radikaaleja, jotka ovat erittäin reaktiivisia. Radikaalien muodostumisen vuoksi myös jäteveden desinfiointi on mahdollista ultraäänellä.

Tässä opinnäytetyössä on selvitetty, miten ultraäänen taajuus, teho ja käsittelyaika vaikuttavat jätevedenpuhdistusprosessin kulkuun ja tuloksiin. Työssä tutkittiin erilaisia ultraääniteknologian sovelluksia vedenkäsittelyprosessissa, kuten

membraanisuodatusta, sameuden käsittelyä, levien poistoa, lietteen poistoa ja desinfiointiprosessia.

Membraanisuodatuskalvoja voi pitää puhtaana ultraäänellä taajuusalueella 70 – 620 kHz vahingoittamatta niitä. Ultraäänellä suodatus on parantunut jopa 200 %, kun ultraäänen intensiteetti on ollut 5 W/cm². Puhdistuksia on saatu aikaiseksi myös 40 kHz:n taajuudella ja 500 W:n teholla. Hyviä puhdistustuloksia on saatu myös 20 kHz:n ja 28 kHz:n taajuudella. Ultraääni parantaa membraanisuodatuksen laatua ja pitää suodatuskalvot puhtaana. Kalvojen ikä pitenee. Prosessia ei tarvitse pysäyttää puhdistusta varten.

Ultraäänellä voi vähentää jäteveden sameutta. Kun teho on pidetty vakiona 40 W:ssa, sameus on vähentynyt eniten, kun taajuus on ollut 28 kHz. Kun taajuus on pidetty 28 kHz:ssä, optimaalisin teho on ollut 60 W. Monet taajuudet ja tehot ovat vähentäneet sameutta, mutta vaikutus ei ole ollut stabiili. Stabiili vaikutus saadaan kuitenkin yhdistelmällä 40 kHz ja 60 W. Tällä yhdistelmällä veden sameus on laskenut 10,3 NTU:sta 1,48 NTU:hun.

Ultraääni on osoittautunut hyödylliseksi myös, kun leviä poistetaan jätevedestä. Tulokset ovat osoittaneet, että mikrokystiiniä on pystytty hajottamaan ultraäänellä jopa 100-prosenttisesti käyttämällä 20 kHz:n taajuutta 120 minuutin ajan. Mikrokystiiniä on pystytty hajottamaan 67 %, kun taajuus on ollut 28 kHz ja teho 20 W. Yhdistämällä ultraääniä ja koagulointi saadaan stabiilein tulos, ja jopa 93 prosenttia mikrokystiinistä tuhoutuu.

Ultraäänikäsittelyllä jätevesien lietteen pitoisuus voi laskea kymmeniä prosenteja. Ultraääni hajottaa erityisesti suuria ja hauraita alkueläinsoluja, jotka sisältävät paljon sidottua vettä. Vapautettu vesi poistetaan suodattimella. Sonikointiaika on yksi tärkeimmistä prosessiin vaikuttavista muuttujista. Ultraäänikentän tehon vaikutuksesta prosessiin on ristiriitaisia tuloksia. Kiintoaineen pitoisuuden nostamisessa optimaalisin yhdistelmä on ollut alhainen teho ja pitkä sonokointiaika. Ultraäänikäsittely lietteen poistossa on perinteisiä menetelmiä yksinkertaisempaa, tehokkaampaa ja halvempaa.

Jäteveden desinfioinnissa ei tarvitse käyttää kemikaaleja, koska ultraäänellä voi jätevedestä tappaa *E.colin* kaltaisia bakteeria. *E.coli*-bakteerin tappamiseen paras teho on 250 W, ja kaikilla taajuuksilla on saatu bakteereista tapettua yli puolet. 27,5 kHz:n taajuudella on pystytty tuhoamaan *E.colia* 99-prosenttisesti. Jos radikaaleista ei muodostu tarpeeksi vetyperoksidia, puhdistusta voi tehostaa lisäaineella. Näin saadaan bakteerit tuhoutumaan kokonaan. Hyviä lisäaineita ovat vetyperoksidi ja TiO_2 .

Tämän opinnäytetyön tulokset osoittavat, että sonokemiaan perustuva tekniikka voi parantaa jäteveden käsittelyprosessia ympäristöystävällisesti ja kustannustehokkaasti. Kun ultraääntä käytetään jäteveden puhdistukseen, vähenevät prosessin vaiheet verrattuna perinteisiin menetelmiin ja vaiheista tulee yksinkertaisempia. Ultraäänikäsittelyssä kemikaalien käyttö vähenee, ja joissain tapauksissa kemikaaleja ei tarvita lainkaan. Sonokemian tekniikka on kehittynyt viime vuosina, ja laitteet ovat tulleet halvemmiksi ja tehokkaammiksi. Suomessa ja muualla maailmassa jatkuu tutkimus ultraäänen käytöstä jäteveden ja juomaveden puhdistuksissa, muuan muassa miten teho, intensiteetti, taajuus ja sonokointiaika vaikuttavat optimaaliseen puhdistustulokseen.

Lähteet

- 1 Cintas, P. & J. Mason, Timothy. 1999. Handbook of green Chemistry and Technology. Elsevier.
- 2 Maria van Iersel, Maikel. 2008. Sensible Sonochemistry. Eindhoven: University of Technology.
- 3 Kananen, Ville. 2017. Tehoultraäänellä lietteen soluseinämien rikkominen. Altum Technologies
- 4 Grieser, Franz & Enomoto, Naoya. 2015. Sonochemistry and the Acoustic Bubble. Ebook.
- 5 Leong, Thomas & Sandra, Kentish. The fundamentals of power ultrasound. University of Melbourne.
- 6 Dale, Ensminger & Leonard, J. Bond. 2012. Ultrasonics. CRC Press.
- 7 Doraiswamy L.K. & Leigh, C. Hagenson. 1999. Sonochemistry Science and Engineering. University of Ames.
- 8 Cuiling, Gong & Doulgas, P. Hart. 1998. Ultrasound Induced Cavitation and Sonochemical Yields. Massachusetts Institute Of Technology.
- 9 Kabata, Laura. Jätevedenpuhdistus.
- 10 Jätevesi. Verkkoaineisto. Tieteen termipankki.
- 11 Rehevöitymisen torjunta. Symbioosi 3 – Ympäristöekologia.
- 12 Puhdistamme jätevedet tehokkaasti. Verkkoaineisto. Jätevedenpuhdistamo.
- 13 Peltö-Huikko, Aino & Vieno Niina. 2009. Vesikoulu. Verkkoaineisto. Vesi-Instituutti Wander/Prizztech Oy.
- 14 Puhdistamoliete. Verkkoaineisto. Wikipedia. <
https://fi.wikipedia.org/wiki/Puhdistamoliete#Lietteen_käsittely >. Luettu 26.4.2019.

- 15 Toze, Simon. 1997. Microbial Pathogens in wastewater. Multi-divisional Research Program.
- 16 Arola, Kimmo. 2013. Membraanisuodatuksen hyödyntäminen kunnallisessa jätevedenpuhdistuksessa. Opinnäytetyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Theseus-tietokanta.
- 17 Kabata, Laura. Jätevedenpuhdistus. Verkkoaineisto. <<https://jatevedenpuhdistus.wordpress.com/jatevedenpuhdistus/jatevesi/>>. Luettu 26.4.2019.
- 18 Doosti, Kargar M.R.& Sayadi,M.H. 2012. Water treatment using ultrasonic assistance. Birjand.
- 19 Turbidity measurement.<
https://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/emergencies/fs2_33.pdf>. Luettu 28.9.2018.
- 20 Solubiologia. 2006. Solunetti.fi. < <http://www.solunetti.fi/fi/solubiologia/levat/2/>>. Luettu 2.3.2019.
- 21 Kinnunen, Jari. 2013. Jätevedenpuhdistus riinnakkaisaostuslaitoksella. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 22 Mobaraki, Mojtaba. 2016. Investigating high-power ultrasonic vibration and vacuum as methods to enhance the extraction of water from municipal wastewater sludge. Diplomityö LUTPub.
- 23 Kyllönen, Hanna & Pirkonen, Pentti. 2007. Ultrasonically assisted dewatering of waste activated sludge. International congress on Acoustics Madrid.
- 24 Hautamäki, Salla. 2012. Jäteveden mikrobiologiset pikamääritysmenetelmät. Opinnäytetyö. Theseus-tietokanta.
- 25 Kumar Kesari, Kavindra & Kumar, Sanjay. 2011. Influence of ultrasonic treatment in sewage sludge. Hydrology Current Research Jaipur.