

Mikko Pulli

ULTRAÄÄNIPESUTEHOKKUUDEN MITTAUSMENETELMÄN KEHITYS

Opinnäytetyö
Energiatekniikan koulutusohjelma

Joulukuu 2015



KYAMK
University of Applied Sciences

Tekijä	Tutkinto	Aika
Mikko Pulli	Insinööri	Joulukuu 2015
Opinnäytetyön nimi		
Ultraäänipesutehokkuuden mittausmenetelmän kehitys		34 sivua
Toimeksiantaja		
Outotec (Finland) Oy		
Ohjaaja		
Lehtori Vesa Kankkunen, technology manager Bjarne Ekberg		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää mittausmenetelmä ultraäänipesutehokkuuden tutkimiseksi Outotec Larox Ceramec -suodattimessa. Ceramec suodattimessa keraamisten suodatinlaattojen regenerointiin käytettävä ultraäänipesu on keskeinen tekijä laitteen kapasiteetin ylläpitämisessä. Ultraäänipesun toimivuutta on aiemmin arvioitu silmämääräisesti laattojen pintaa arvioimalla sekä tutkimalla käytettyjen laattojen läpäisevyyttä laboratoriokeihin.</p> <p>Työhön sisältyi laajamittainen tutustuminen ultraäänipesun teoriaan, pietsosähköiseen ilmiöön ja materiaaleihin sekä ultraäänipesussa käytettäviin laitteistoihin. Tutkimustyötä varten rakennetulla testilaitteistolla on pystytty keräämään monipuolista tietoa ultraäänipesun ominaisuuksista.</p> <p>Opinnäytetyössä käydään läpi ultraäänipesun teoriaa, pietsosähköistä ilmiötä sen taustalla, luodaan lyhyt katsaus käytettäviin materiaaleihin sekä esitellään anturilaatan ja mittausjärjestelmän kehitystyö. Testilaitteistolla tehtyjen mittausten tulokset esitellään työn loppupuolella.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena kehitetty mittausjärjestelmä mahdollistaa ultraäänipesun toimivuuden tutkimisen tuotanto-olosuhteissa ja mahdollistaa vaihtoehtoisten pesumenetelmien kehityksen ilman aikaa vievää tutkimus- ja seurantatyötä.</p>		
Asiasanat		
ultraäänipesu, pietsosähköinen ilmiö, kavitaatio, mittaustekniikka		

Author	Degree	Time
Mikko Pulli	Bachelor of Engineering	December 2015
Thesis Title		
Development of Measurement Method for Ultrasonic Cleaning Efficiency		34 pages
Commissioned by		
Outotec (Finland) Oy		
Supervisor		
Vesa Kankkunen, Senior Lecturer, Bjarne Ekberg, Technology Manager		
Abstract		
<p>The objective of this study was to develop a method for measuring ultrasonic cleaning efficiency in Outotec Larox Ceramec filter. Ultrasonic cleaning of ceramic filter plates during the regeneration cycle is a key factor for maintaining the capacity of the filter. The functioning of ultrasonic washing has previously been assessed visually by examining the surface of the plates, and examining the permeability of used plates in a laboratory.</p> <p>The thesis includes large-scale research on the ultrasonic cleaning theory, the piezoelectric effect and the materials and equipment used in the ultrasonic wash. Constructed test equipment has provided the opportunity to collect versatile information about the properties of ultrasonic cleaning.</p> <p>The thesis discusses the ultrasonic washing, the theory of piezoelectric phenomena behind it, provides a brief overview of the available materials and presents the development of a sensor plate and measuring system. The results of the measurements made by using the test equipment are presented at the end of the study.</p> <p>As a result of the thesis, the developed measurement system enables the study of ultrasonic washing efficiency under production conditions, as well as allows development of alternative cleaning methods without time-consuming research and monitoring work.</p>		
Keywords		
ultrasonic cleaning, piezoelectric effect, cavitation, measurement technology		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	OUTOTEC LAROX CERAMEC	6
2.1	Käyttökohteet.....	7
2.2	Prosessivaiheet	7
3	ULTRAÄÄNIPESUN TEORIAA.....	9
3.1	Ääniaallon syntyminen.....	9
3.2	Ääniaallon luonne	10
3.3	Kavitaatio.....	11
3.4	Taajuus.....	12
3.5	Tunnetut ultraäänipesuun vaikuttavat tekijät.....	13
4	PIETSOSÄHKÖINEN ILMIÖ JA MATERIAALIT	15
5	ULTRAÄÄNIGENERAATTORI	17
6	ANTURIN KEHITYS	18
7	TESTILAITTEISTO.....	19
7.1	Anturilaatan ensimmäinen kehitysversio.....	21
7.2	Anturilaatan toinen kehitysversio	23
7.3	Mittalaitteet ja langaton tiedonsiirto.....	24
8	MITTAUKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY	27
9	POHDINTAA.....	30
	LÄHTEET.....	32
	KUVALUETTELO.....	33

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää mittausmenetelmä ultraäänipesutehokkuuden mittaamiseksi Outotec Larox Ceramec -suodattimessa. Ultraäänipesu yhdistettynä happopesuun on keskeinen tekijä suodatinlaitteen kapasiteetin ylläpitämisessä. Keraamisten suodatinlaattojen tukkeutuminen johtaa suodattimen kapasiteetin laskuun ja voi johtaa tilanteeseen, jossa laattojen puhdistaminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta.

Ultraäänipesuintervalli yhdistettynä happopesuun on tyypillisesti noin 8 tuntia. Pesusyklin aikana suodatin on poissa varsinaisesta tuotannosta. Pesusyklin optimointi on siksi tärkeä laitteen tuotantokapasiteettiin vaikuttava tekijä. Pesusyklin tavoitteena on palauttaa keraamisten suodatinlaattojen läpäisy tasolle, jolla mitoitusarvojen mukainen kapasiteetti voidaan ylläpitää. Yhdistetyn ultraääni- ja happopesun kesto on tyypillisesti noin 45 minuuttia. Pesun kokonaisaikaan lisätään myös suodatinlaattojen tyhjentämiseen, ja ennen ja jälkeen pesun suoritettavan laattojen ja altaan huuhteluun kuluva aika. Koska kaivosteollisuuden laitteissa suuntaus on yhä suurempiin yksikkökokoihin, ja laitteen koko vaikuttaa huuhtelu- ja täyttöaikojen pituuteen. Pesusyklin optimoinnin merkitys korostuu laitekoon kasvaessa.

Ultraäänipesun tehokkuuden mittaustieto mahdollistaa pesuun vaikuttavien tekijöiden tutkimisen ja antaa mahdollisuuksia vaihtoehtoisten pesutapojen kehittämiseen. Yhtenä tavoitteena on kehittää menetelmä, jossa lyhyitä ultraäänipesuja tehdään suodatettavan rikastelietteen läpi tyhjentämättä suodattimen allasta. Tätä lieteultraukseksi kutsuttua menetelmää on aiemmin menestyksellä kokeiltu pienemmissä laitteissa.

2 OUTOTEC LAROX CERAMEC



Kuva 1. Outotec Larox Ceramec. Outotec (Finland) Oy). 2015.

Outotec Larox Ceramec -kiekkosuodattimen (Kuva 1) toiminta perustuu keraamimateriaalista valmistettuihin laattoihin, joiden mikrohuokoinen rakenne sallii ainoastaan nesteen virtauksen suodatinväliaineen läpi. Suodos imeytyy paine-eron vaikutuksesta keraamisen laatan läpi laatan ollessa lietepinnan alapuolella, ja kakku muodostuu laatan pinnalle. (1.)

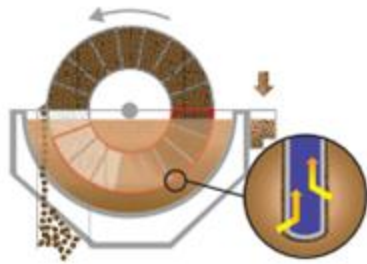
Lähes absoluuttisesta tyhjiöstä huolimatta ilmaa ei juuri virtaa suodatinväliaineen lävitse. Pienestä väliaineen ilmanläpäisystä johtuen Ceramec -suodatin tarvitsee hyvin pienen alipainepumpun paine-eron ylläpitämiseksi, tämä on suurin ero verrattuna perinteisiin alipainesuodattimiin, joissa ilman virtaus suodatinkeleeseen ja kakun lävitse on suurta. Muodostunut kiintoainekakku poistetaan laattojen pinnasta kaavareiden avulla, jolloin paineilmapuhalluksen tarvetta kakun irrottamiseen ei ole. Pyörivän rummun ansiosta suodatin on jatkuvatoiminen, uusi suodatusjakso alkaa välittömästi kakun irrotuksen ja kääntäispuusuvaiheen jälkeen. Laatan ilmaa läpäisemättömän rakenteen, ja pienen paineilman kulutuksen vuoksi Ceramec -suodattimen energiankulutus on hyvin pieni verrattuna perinteisiin vakuumsuodattimiin. Laatan mikrohuokoisesta rakenteesta johtuen myös suodos on erittäin puhdasta verrattuna perinteisiin vakuumsuodattimiin, joissa hienojakoiset partikkelit läpäisevät suodatinväliaineena käytetyn suodatinkeleeseen. Suuresta paine-erosta johtuen laatan pinnalle muodostuneen kakun jäännöskosteus on myös hyvin alhainen. (1.)

2.1 Käyttökohteet

Kapillaari-ilmiöön ja mikrohuokosiin keraamisiin suodatinlaattoihin perustuva neste- ja kiintoaineen erotusmenetelmä on poikkeuksellisen monipuolinen kaivosteollisuuden neste- ja kiintoaineen erotustarpeisiin. Suodinlaatta kestää yleisimpiä kemikaaleja sekä lämpötiloja, joita kaivosteollisuuden rikastusprosesseissa esiintyy. (1.)

Ceramec suodatinta käytetään tyypillisesti neste- ja kiintoaineen erotukseen perusmetallisovelluksissa, joissa lietteen kiintoainepitoisuus on korkea ja partikkelikoko on karkeampaa kuin 40 mikronia. Rautamalmin, kromiitin ja ferrokromin suodatukseen on kehitetty erityisiä korkean virtauksen suodatinmalleja, jotka mahdollistavat suuren kapasiteetin. (1.)

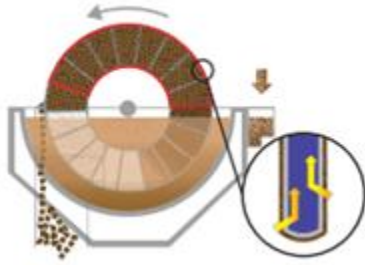
2.2 Prosessivaiheet



Kuva 2. Kakunmuodostus. Outotec (Finland) Oy). 2015.

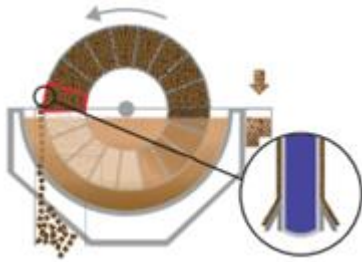
Kiintoainekerros, jota kutsutaan yleisesti kakuksi (Kuva 2), muodostuu keraamisten laattojen pinnalle niiden pyöriessä suodatettavalla lietteellä täytetyssä altaassa. Paine-eron ansiosta neste siirtyy laatan lävitse ja siitä eteenpäin suodoskanavaan vakuumpumpun muodostaman vakuumin avustuksella. (1.)

Muodostunut kiintoainekerros ja laatan mikrohuokoinen rakenne estävät partikkeleiden tunkeutumisen laatan sisään. Laatan sisään ja putkistoon kertynyt suodos siirretään vakuumpumpun luoman tyhjiön avulla suodossäiliöön, josta se pumpataan suodospumpun avulla ulos prosessista. Ceramec suodattimen suodos on tyypillisesti erittäin puhdasta verrattuna muiden neste- ja kiintoaineen erotukseen käytettävien tekniikoiden tuottamaan suodokseen. (1.)



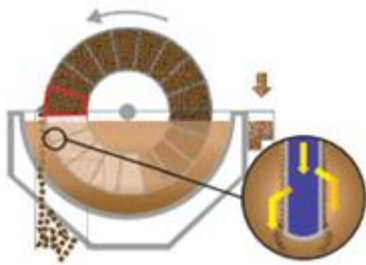
Kuva 3. Kuivaussektori. Outotec (Finland) Oy). 2015.

Kakun kuivaus (Kuva 3) käynnistyy välittömästi laatan noustessa ylös lietteestä. Rummun pyöriessä paine-eroon perustuva kuivaustapahtuma jatkuu keskeytymättä, kunnes kaikki vapaa neste on poistunut kakusta. Koska ilma ei kapillaari-ilmion takia läpäise laatan mikrohuokoista rakennetta, saavutetaan kakun pieni jäännöskosteus hyvin alhaisella energiankulutuksella. (1.)



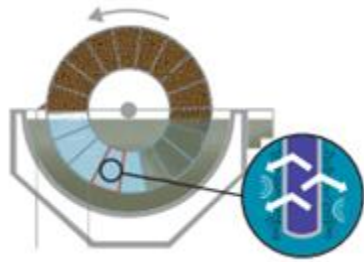
Kuva 4. Kakun irrotus. Outotec (Finland) Oy). 2015.

Kaavarit poistavat muodostuneen kakun laattojen pinnasta (Kuva 4). Keraamisesta materiaalista valmistetut kaavarit eivät kosketa laatan pintaa. (1.)



Kuva 5. Käänteispesu. Outotec (Finland) Oy). 2015.

Kakun irrotuksen jälkeen laatta huuhdellaan käänteispesusektorissa (Kuva 5). Käänteispesuun käytetään tyypillisesti suodosta, jonka ylipaine poistaa laatan pintaan ja huokosiin jääneen kiintoaineen. Käänteispesun avulla laatta säilyttää kapasiteettinsa pidempään, ja se mahdollistaa yhtäjaksoisen suodatuksen regenerointi-intervallien välisen ajan. Käänteispesu on automaattinen ja säädettävissä. (1.)



Kuva 6. Laattojen regenerointi. Outotec (Finland) Oy). 2015.

Jotta laatat säilyttäisivät kapasiteettinsa, niitä regeneroidaan (Kuva 6) säännöllisin väliajoin. Regenerointi-intervalli on tyypillisesti noin 8-12 tuntia, riippuen kuitenkin suodatettavan aineen kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Regeneroinnin aikana laattojen pintaa puhdistetaan ultraäänipesulla, joka poistaa laatan pintaan pinttyneen kerrostuman. Pesunesteenä käytetään joko laimeaa rikki- tai typpihappoliuosta. (1.)

3 ULTRAÄÄNIPESUN TEORIAA

Ultraääneksi kutsutaan ääniaaltoja, jotka ovat ihmisen kuuloalueen yläpuolella. Ultraäänien taajuus määrittelee sen äänenkorkeuden, korkeat taajuudet tuottavat korkeita tai diskanttiääniä ja vastaavasti matalat taajuudet tuottavat matalia tai bassoääniä. Ultraääni on taajuus, jonka äänenkorkeus on niin korkea, että sitä ei voi kuulla ihmiskorvalla. Ultraääniksi kutsutaan yleisesti taajuuksia, jotka ovat yli 18 KHz. (2.)

Ultraäänipesuun käytettävät taajuudet ovat yleensä välillä 20 KHz – 100 KHz. Teollisen mittakaavan pesureissa käytetään yleisesti taajuuksia välillä 20 KHz - 50 KHz ja yli 50 KHz taajuuksia käytetään pienissä pöytämallin laitteissa sekä herkempien komponenttien pesussa, esimerkiksi elektroniikan sekä jalokivien puhdistuksessa ja lääketieteellisissä laitteistoissa. (2.)

3.1 Ääniaallon syntyminen

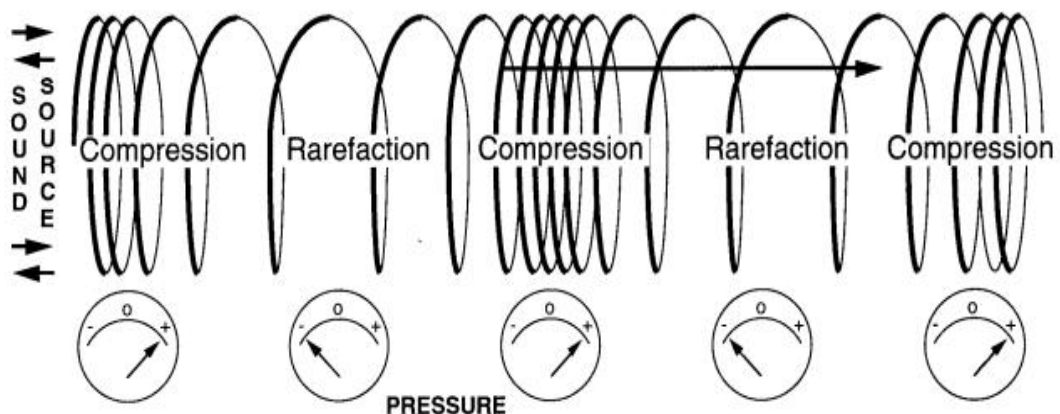
Ääniaalto syntyy, kun yksittäinen värähdys tai jatkuva värähtely esiintyy ääntä johtavassa väliaineessa. Hyvänä esimerkkinä värähtelyn aiheuttamasta ääniaallon aaltoliikkeestä voidaan käyttää kaiuttimen kartion liikettä. Koska kaiuttimen kartio liikkuu edestakaisin, ilma kartion edessä vuoroin tiivistyy ja ohentuu kehittämällä ääniaaltoja, jotka etenevät ilmassa, kunnes viimein vaimenevat.

Iskuaalto syntyy esimerkiksi äkillisestä ilman tilavuuden muutoksesta sähköpurkauksen takia. Pitkän salaman eri osien aiheuttama ääniaalto voi myös kuulua pitkänä yhtäjaksoisena jyrinä. (2.)

3.2 Ääniaallon luonne

Seuraava kuva (Kuva 7) esittää jouta esimerkkinä ääntä johtavan väliaineen yksittäisestä molekyylistä. Molekyylit väliaineessa ovat vuorovaikutuksessa viereisiin molekyyleihin aivan kuin jousen eri kierrokset ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa. (2.)

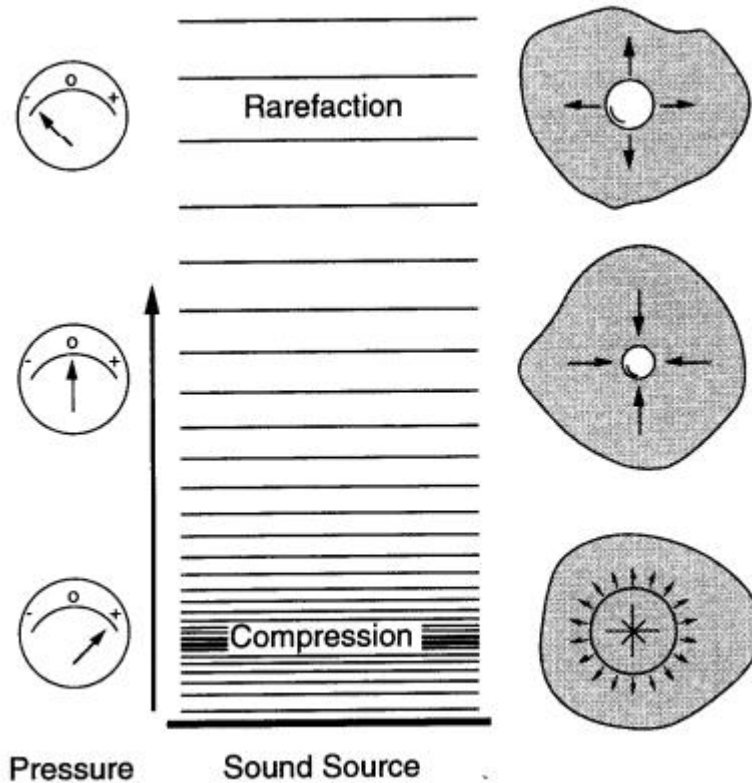
Äänilähde on kuvassa vasemmalla. Äänilähteen liikuessaan kehittämä paine etenee jousen pituudella yksittäisten jousen kierrosten painautuessa vasten naapurikierrosta. On kuitenkin tärkeää huomata, että ääniaallon kulkiessa jousen päästä päähän yksittäinen jousen kierros säilyttää saman suhteellisen paikkansa liikkuen ensin toiseen suuntaan ja sitten takaisin ääniaallon kulkiessa sen lävitse. Siksi jokainen yksittäinen jousen kierros on ensin puristuneena jousen seuraavaa kierrosta vasten, ja tämän jälkeen venyneenä sen väistäessä viereistä jousen kierrosta. Samalla tavalla ääntä johtava väliaine on vuoroin altistettuna yli- tai alipaineelle. Puristusvoiman aikana paine väliaineessa on positiivinen, ja alipaineen aikana paine väliaineessa on negatiivinen. (2.)



Kuva 7. Ääniaallon luonne. Fuchs, F. 2002.

3.3 Kavitaatio

Elastisissa väliaineissa, kuten ilmassa ja useimmissa kiintoaineissa, ääniaaltojen eteneminen on jatkuvaa, kun ääniaaltoa lähetetään. Ei elastisissa väliaineissa, kuten vesi ja useimmat nesteet, ääniaaltojen eteneminen on jatkuvaa, jos ääniaallon amplitudi on suhteellisen matala. (2.)



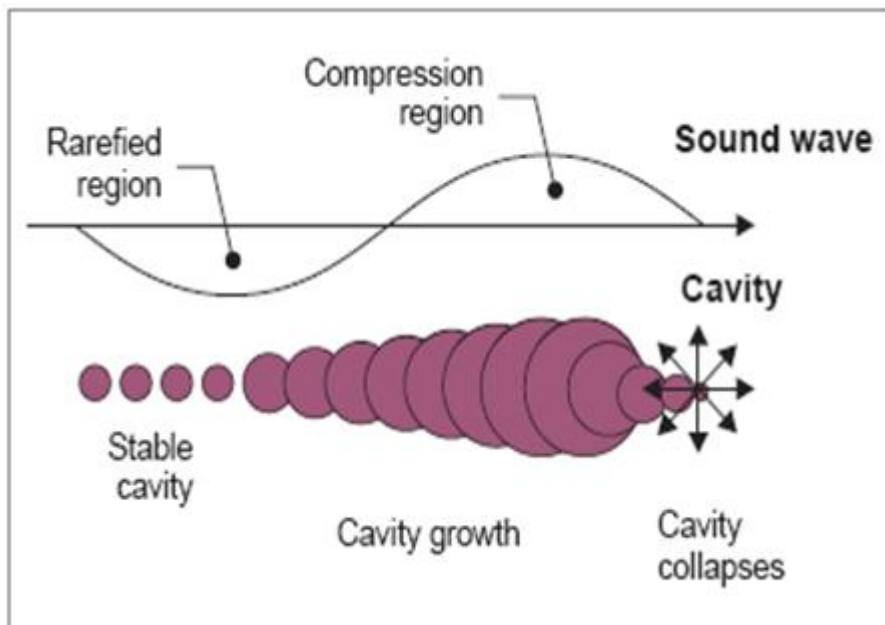
Kuva 8. Kavitaatiokuplan muodostuminen. Fuchs, F. 2002.

Kulkiessaan nesteen lävitse ääniaallot aiheuttavat nesteessä kokoonpuristumista ja laajentumista. Kokoonpuristumisvaiheen aikana nesteen molekyylit ovat puristuneina tiukasti toisiaan vasten, vastaavasti laajentumisvaiheen aikana molekyylit siirtyvät nopeasti erilleen. Laajentumisvaiheen nopeuden takia molekyylit repeytyvät irti toisistaan synnyttäen mikroskooppisia kaasukuplia. (2.) Kuplia on mahdotonta havaita paljaalla silmällä niiden mikroskooppisen koon ja lyhyen elinajan vuoksi. Syntyneet kaasukuplat sisältävät alipaineista kaasua tai höyryä. (3.)

Ympäröivän paineen kasvaessa kupla muuttuu epävakaaaksi ja lopulta romah-
taa (Kuva 8) synnyttäen korkeanopeuksisia suihkuvirtauksia, paineiskuja ja
lämpötilan, joka voi kohota jopa 5000 celsiusasteeseen. (4). Suihkuvirtauk-
sien, paineiskujen ja lämpötilan nousun takia puhdistettavan kappaleen pin-
nalla olevat epäpuhtaudet irtoavat kappaleesta tehokkaasti. Kavitaatiokuplien
(Kuva 9) lyhyen elinkaaren ja mikroskooppisen koon vuoksi puhdistettava kap-
pale ei juuri lämpene, kavitaatiokuplien romahduksessa syntynyt lämpö siirtyy
pesussa käytettävään väliaineeseen.



Kuva 9. Kavitaatiokupla ennen romahdusta. Precision cleaning systems



Kuva 10. Kavitaatiokuplan elinkaari. Hesson, J.

3.4 Taajuus

Käytettävä taajuus vaikuttaa kavitaatiokuplien kokoon, lukumäärään ja niistä
vapautuvaan energiaan. Matala taajuus aikaansaa suuremmat kavitaatiokup-
lat kuin korkea taajuus, korkeammilla taajuuksilla sen sijaan kavitaatiokuplia
muodostuu lukumääräisesti enemmän.

Kavitaatiokuplien määrä on suoraan verrannollinen käytettävään taajuuteen. Syötettävän taajuuden pysyessä samana 25 KHz, 40 KHz ja 68 KHz laitteistossa, muodostuu 40 KHz nimellistaajuuden laitteistossa 60 % enemmän kavitaatiokuplia kuin 25 KHz laitteistossa. Vastaavasti 68 KHz laitteistossa muodostuu 70 % enemmän kavitaatiokuplia kuin 40 KHz laitteistossa. (5.)

Laitteistoissa joissa käytetään taajuuksia välillä 20–25 KHz, muodostuvien kavitaatiokuplien lukumäärä on pienempi, mutta niistä vapautuva energia niiden romahtaessa on huomattavasti suurempi kuin korkeammilla taajuuksilla. Kuplien lukumäärästä johtuen pesutulos voi olla epätasaisempi kuin korkeammilla taajuuksilla, ja vapautuva energiamäärä voi aiheuttaa vaurioita myös puhdistettavassa kappaleessa. Myös ultraäänivärähtelijöihin kohdistuu matalilla taajuuksilla huomattavasti enemmän korroosioriskiä. Matala taajuus aiheuttaa myös haja- ja aliharmonisia aaltoja, jotka ovat ihmiskorvalla kuultavissa ja usein häiritseviä. (5.)

Nimellistaajuudeltaan 30–40 KHz laitteistot ovat yleensä sopivia yleisimpiin puhdistustarkoituksiin. Suuremmasta kuplien lukumäärästä johtuen puhdistustulos on tasaisempi, ja kavitaatiokuplien romahduksessa vapautuva energiamäärä ei vahingoita puhdistettavia kappaleita. (5.)

Taajuusalueella 60–80 KHz kavitaatiovoimat ovat huomattavasti pienempiä kuin käytettäessä matalampia taajuuksia. Lyhyestä aallonpituudesta johtuen kavitaatiokuplien lukumäärä on suurempi, mutta tasalaatuista puhdistustulosta ei välttämättä kuitenkaan saavuteta. Itse ultraäänilaitteistoon kohdistuva korroosioriski pienenee käytettäessä korkeampia taajuuksia. Korkeampia taajuuksia käytetään erikoissovelluksissa, kuten elektroniikan valmistukseen liittyvissä puhdistuksissa. (5.)

3.5 Tunnetut ultraäänipesuun vaikuttavat tekijät

Vaikka ultraäänipesu on tunnettua teknologiaa jo noin 60 vuoden ajalta, luotettavia menetelmiä kavitaation mittaamiseksi ei ole juurikaan kehitetty.

Pesutehokkuutta on lähinnä arvioitu silmämääräisesti puhdistetuista kappaleista, kappaleiden painoa mittaamalla, valkoisen kohinan mittauksin sekä

ehkä tunnetuimpana testimenetelmänä sijoittamalla alumiinifolion palanen kavitaatiokenttään. Alumiinifolion eroosiota tutkimalla on voitu päätellä kavitaation jakautuminen eri pisteissä, ja tutkia mahdollisia seisovan aallon alueita, joissa kavitaatiota ei esiinny. (6.)

Tunnettuja ultraäänipesuun vaikuttavia tekijöitä ovat väliaineen viskositeetti, tiheys, höyrynpaine, pintajännitys, nesteeseen sitoutuneiden kaasujen määrä sekä lämpötila (7).

Väliaineen matala viskositeetti edistää kavitaatiokuplan syntymistä. Korkeaviskositeettinen siirappityyppinen väliaine vaatii suuremman määrän energiaa ultraääniaallon etenemiseksi. Korkeaviskositeettinen väliaine myöskin hidastaa kavitaatiokuplan kasvua ja pienentää sen kokoa. (7.)

Väliaineen tiheyden kasvaessa kavitaatiokuplien muodostumiseen vaaditaan enemmän energiaa. Koska laitteistoon asennettua tehoa ei usein ole mahdollista muuttaa, ultraääniaallon eteneminen vaikeutuu ja muodostuvien kavitaatiokuplien määrä ja koko pienenee väliaineen tiheyden kasvaessa. (7.)

Kavitaatiokupla syntyy paineen pudotessa äkillisesti alle nesteen höyrynpaineen. Mitä matalampi väliaineen höyrynpaine on, sitä vähemmän energiaa tarvitaan kavitaatiokuplien muodostumiseen. Vastaavasti kavitaatiokupla romahtaa sitä ympäröivän paineen noustessa yli nesteen höyrynpaineen. (7.)

Mitä pienempi väliaineen pintajännitys on, sitä vähemmän energiaa tarvitaan kavitaatiokuplien muodostamiseen. Väliaineen pintajännitykseen voidaan vaikuttaa lisäämällä väliaineeseen saippuaa tai muuta pintajännitystä vähentävää kemikaalia. (7.)

Nostamalla väliaineen lämpötilaa voidaan vaikuttaa useampaan pesutehokkuuteen vaikuttavaan seikkaan. Lämpötilan nosto alentaa väliaineen pintajännitystä, viskositeettia ja lisää molekyylien liikettä väliaineessa. Nostamalla väliaineen lämpötilaa voidaan myös vähentää siihen sitoutuneen ilman ja kaasun määrää. Väliaineena käytetty neste sisältää aina jonkin verran siihen sitoutunutta ilmaa. Kavitaatiokuplien muodostuessa kuplat täyttyvät ilmalla, joka hidastaa kuplan romahtamista aiheuttaen pesutehon heikkenemistä. (7.)

Väliaineen lämpötilan nosto lähelle nesteen höyrynpainetta edistää kavitaatiokuplien muodostumista. Korotetussa lämpötilassa syntyneet kavitaatiokuplat sisältävät myös höyryä, joka on kavitaation tehokkain muoto. Käytettäessä puhdasta vettä väliaineena kavitaatio on tehokkaimmillaan 70 celsiusasteen lämpötilassa, jonka jälkeen kavitaatio alkaa heiketä. (2.) Pesussa käytettävä väliaine on kuitenkin harvoin puhdasta. Tyypillinen lämpötila jossa saavutetaan paras pesutulos, on noin 50–60 celsiusastetta.

Lämpötilan nosto on kuitenkin harvoin mahdollista teollisen mittakaavan suodatinlaitteissa altaan suuresta tilavuudesta johtuen.

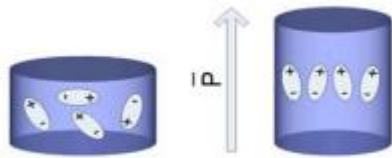
4 PIETSOSÄHKÖINEN ILMIÖ JA MATERIAALIT

Pietsosähköiset värähtelijät muuntavat ultraäänigeneraattorin tuottaman korkeataajuuksisen sähköenergian mekaaniseksi värähtelyksi. Värähtely perustuu pietsosähköiseen ilmiöön, jossa tietyt materiaalit muuttavat muotoaan kytkettäessä ne sähkökenttään. Värähtelijöiden mekaaninen liike aiheuttaa nesteessä paineen muutoksen, joka mahdollistaa kavitaatiokuplien muodostumisen. (2.)

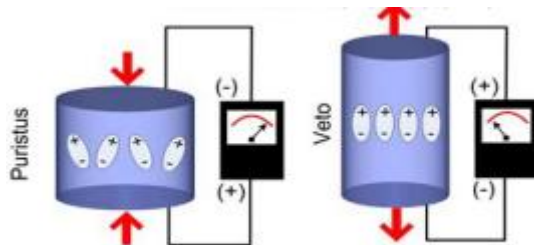
Vuonna 1880 Jacques ja Pierre Curie havaitsivat voiman aiheuttavan sähköisen varauksen kiteisissä materiaaleissa kuten kvartsi ja turmaliini (Kuva 11). Ilmiön he nimesivät pietsosähköiseksi ilmiöksi. Myöhemmissä tutkimuksissaan he havaitsivat sähkökentän aiheuttavan muodonmuutoksia pietsosähköisissä materiaaleissa. Ilmiötä kutsutaan käänteiseksi pietsosähköiseksi ilmiöksi. (8.)

Paine aikaansaa sähköisen varauksen pietsosähköisen materiaalin pinnalla (Kuva 12). Tämä suora pietsosähköinen ilmiö, jota kutsutaan myös generaattori- tai anturi-ilmiöksi, muuntaa mekaanisen voiman sähköenergiaksi. Käänteinen pietsosähköinen ilmiö puolestaan aiheuttaa kappaleessa pituuden muutoksen kytkettäessä kappale sähkökenttään (Kuva 13). Käänteinen pietsosähköinen ilmiö muuntaa sähköisen energian mekaaniseksi energiaksi. (8.)

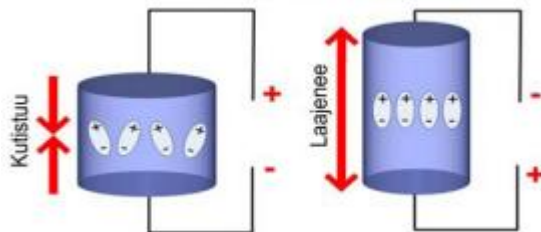
Pietsosähköistä ilmiötä hyödynnetään monissa arkipäivän sovelluksissa kuten sytyttimissä, kaiuttimissa ja signaalimuuntimissa. Ajoneuvokäytössä piet-sähköisten toimilaitteiden käyttö ruiskutussuuttimissa on vähentänyt nopeutensa ja tarkkuutensa ansiosta polttomoottoreiden haitallisia pakokaasupäästöjä. (8.)



Kuva 11. Vasemmalla polaroimaton, oikealla polaroitu pietsosähköisestä materiaalista valmistettu kiekko. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011.



Kuva 12. Materiaalin pinnoille muodostuu jännite kun siihen kohdistetaan voima. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011.



Kuva 13. Materiaali muuttaa muotoaan kun sen pinnoille johdetaan jännite. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011.

Pietsosähköistä ilmiötä esiintyy dielektrisillä yksikiteisillä materiaaleilla, monikiteisillä ferrosähköisillä keraameilla sekä polymeereillä (9; 10).

Pietsosähköiset materiaalit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: luonnossa esiintyviin kideisiin materiaaleihin kuten kvartsi, turmaliini ja Rochellen suola, pietsosähköisiin keraamiseksiin kuten lyijy-zirkonaatti-titanaatti ja lyijy-strontium-zirkonaatti-titanaatti (9) sekä polymeereihin. Polymeerimateriaaleista yleisimmin käytetty on polyvinylifluoridikalvo, PVDF. (10.)

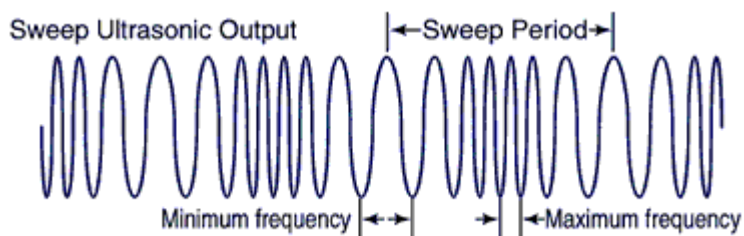
Pietsosähköisten keraamien teollinen läpimurto tapahtui tutkijoiden havaittua lyijy-barium-titanaatti -seoksen omaavan pietsosähköisiä ominaisuuksia hyödyllisessä mittakaavassa (8). Tunnetuin ja yleisin käytössä olevista pietsokeraameista on PZT (lyijy-zirkonaatti-titanaatti). (10.)

Pietsokeraamit jaetaan kahteen ryhmään, joita kutsutaan pehmeiksi ja koviksi pietsokeraameiksi. Kovilla pietsokeraameilla on pehmeitä suurempi jännitevakio ja pehmeillä taas kovia suurempi muodonmuutosvakio. Näiden ryhmien välimaastoon on kehitelty räätälöityjä materiaaleja, jolloin saadaan tarkalleen halutut ominaisuudet. (10.)

5 ULTRAÄÄNIGENERAATTORI

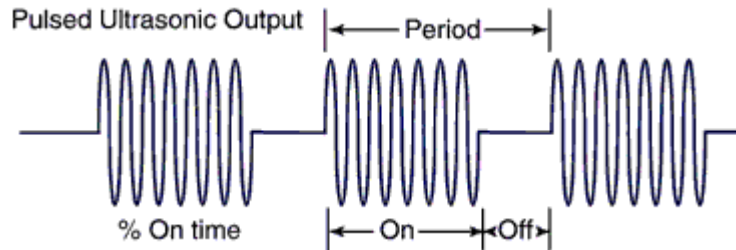
Ultraäänigeneraattori muuntaa syöttöjännitteen 50 Hz -taajuuden ultraäänivärähtelijöiden nimellistaajuuden mukaiseksi siniaaltomuotoiseksi syöttöjännitteeksi. Generaattorin teho määräytyy siihen kytkettyjen ultraäänivärähtelijöiden nimellistehon perusteella. Generaattorin rakenne muistuttaa taajuusmuuttajaa, generaattorin pääkomponentit ovat tasasuuntaaja, välipiiri kondensattoreineen, vaihtosuuntaaja sekä ohjauselektroniikka.

Nykyaikaisten generaattoreiden ohjauselektroniikka tarjoaa mahdollisuuksia vaikuttaa pesutuloksen laatuun. Sweep-toimintoa (Kuva 14) käytettäessä generaattorin lähtötaajuus vaihtelee asetellun nimellistaajuuden ympärillä. Taajuuden vaihtelulla voidaan vaikuttaa seisovien aaltojen syntyyn, jolloin toisiinsa nähden vastakkaisiin suuntiin kulkevat akustiset aallot kumoavat toisensa, eikä kavitaatiota juurikaan esiinny näillä alueilla. (2.)



Kuva 14. Sweep toiminnon vaikutus generaattorin lähtötaajuuteen. Fuchs, F. 2002.

Pulssitoimintoa (Kuva 15) käytettäessä generaattorin lähtö kytketään päälle ja pois asetellun aikaparametrin perusteella. Generaattorin lähdön päälle- ja poiskytkentä voidaan tehdä jopa useita satoja kertoja sekunnissa. Pulssitoiminnolla voidaan vähentää väliaineeseen sitoutuneiden kaasujen määrää. (2.)



Kuva 15. Pulssitoiminnon vaikutus generaattorin lähtötaajuuteen. Fuchs, F. 2002.

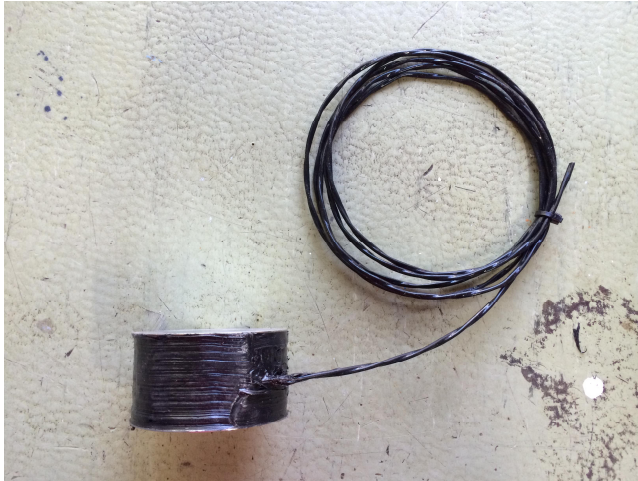
6 ANTURIN KEHITYS

Ultraäänen intensiteetin mittauksiin on kaupallisesti saatavilla erityyppisiä hydrofoneja. Hydrofonien käyttöä tutkittiin ennen projektin aloitusta, mutta niiden korkean hinnan, kemiallisen kestävyvyn ja rikastelietteen sisältämän karkeiden, hiovien partikkelien takia niiden käyttöä ei kokeiltu.

Anturin rakentamiseksi oli kaksi materiaalivaihtoehtoa, pietsosähköinen keraami tai pietsosähköinen PVDF-kalvo. PVDF-kalvon näytekappaleita tilattiin Precision Acoustics -yhtiöltä Englannista testiä varten. Vaikkakin valmistajan ilmoituksen mukaan kalvon kemiallinen kestävyys riittää pesunesteenä käytettävään laimeaan rikki- tai typpihappoon, mekaaninen kestävyys ei ole riittävä rikastepartikkelien hiovia voimia vastaan. Tarkoituksena oli kokeilla erilaisia vaihtoehtoja, joissa PVDF-kalvon paloja sijoitetaan erilaisten ohuiden muovi- ja teräslevyjen väliin.

Samanaikaisesti kuitenkin valmistettiin prototyyppi pietsosähköisestä keraamista. Sijoittamalla keraamilevyjä ruostumattomasta teräksestä valmistettujen päätykappaleiden väliin saatiin samankaltainen kerrosrakenne kuin itse ultraäänivärähtelijöissä. Prototyyppikappaletta testattiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston kemiantekniikan laboratoriossa altistamalla se kädessä pidettävän ultraäänipesulaitteen kavitaatiovoimille ja mittaamalla samanaikaisesti ulostulojännite oskilloskoopilla.

Koska ulostulojännite oli selkeästi mitattavissa ja ultraäänivärähtelijän ja anturin etäisyyden vaikutus oli helposti todettavissa muuttuneesta ulostulosta, kehitystyötä päätettiin jatkaa pietsokeraamista materiaalia käyttäen. Ensimmäisen kehitysversion laattaan tarvittavat neljä anturia (Kuva 16) valmistuivat muutamaa viikkoa myöhemmin.



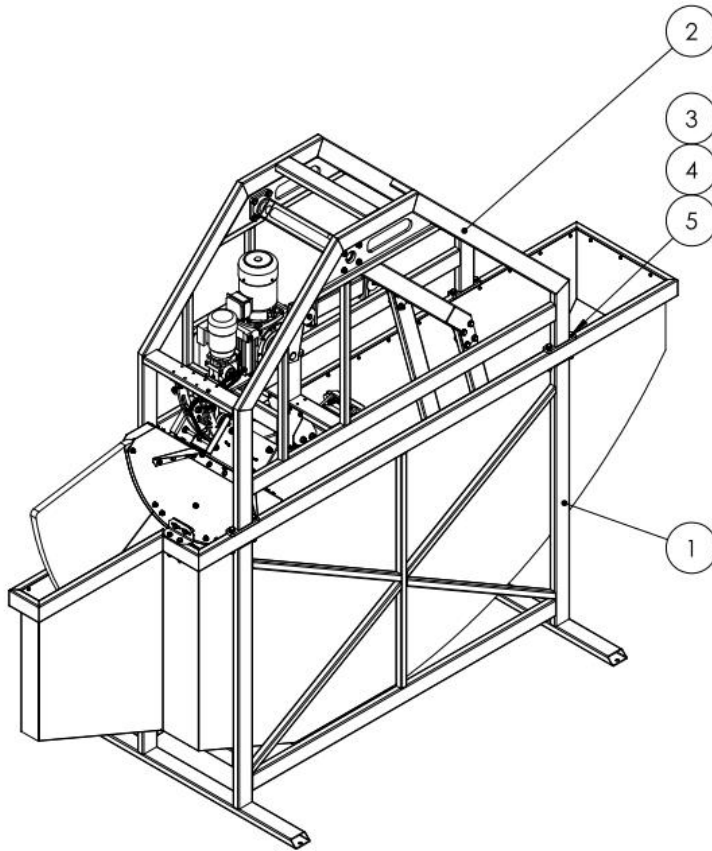
Kuva 16. Anturi valmiina ennen asennusta laattaan.

7 TESTILAITTEISTO

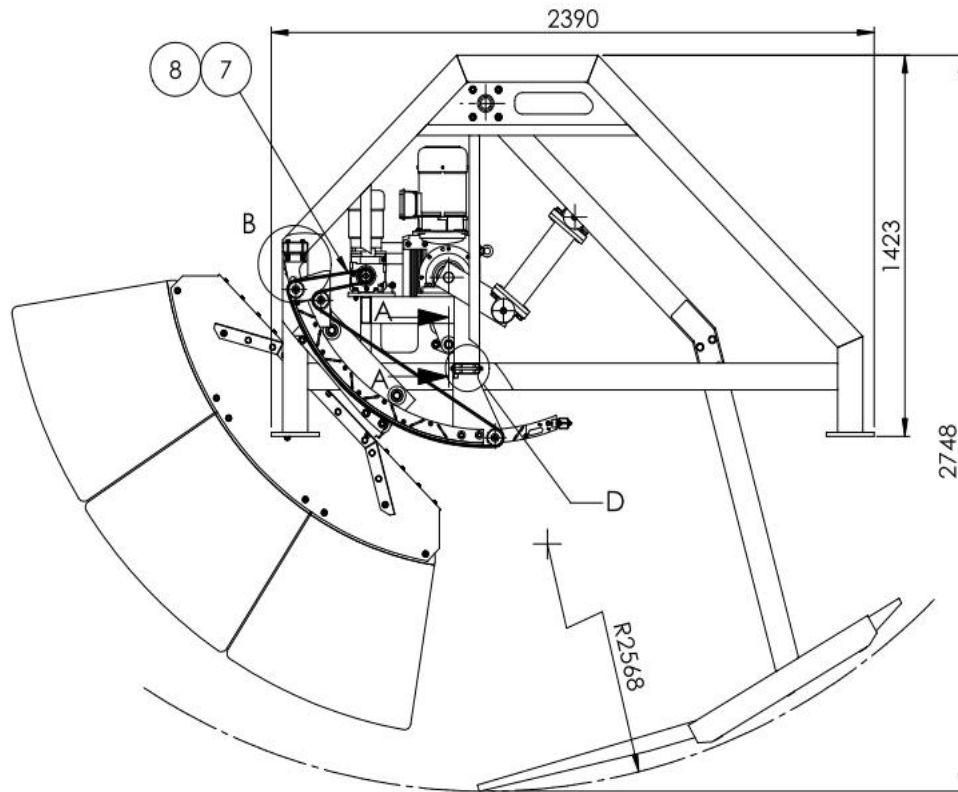
Koemittauksia varten rakennettiin koelaitteisto (Kuva 17). Koelaitteen altaan muoto ja rakenne on mittasuhteiltaan sama kuin tuotantokoon CC-144 -suodattimen allas, jolla taataan mahdollisimman autenttiset olosuhteet koeajoille.

Tuotantolaitteeseen verrattuna suurin ero on rummussa, tuotantolaitteen 15 laatan sijaan testilaitteeseen voidaan asentaa 3 kpl laattoja (Kuva 18). Kolmen laatan käyttöön päädyttiin, koska haluttiin välttää mahdollisesti yhden laatan aiheuttamilta häiriöiltä. Ympäripyörivän rummun sijaan laattoja liikutetaan edestakaisin ultraäänivärähtelijöiden välissä taajuusmuuttajakäytöllä, induktivisten rajakytkinten ohjaamana. Testilaitteeseen asennettiin kaksi kappaletta vakiosuodattimessa käytettäviä, nimellisteholtaan 1200 W olevia ultraäänivärähtelijöitä. Ultraäänivärähtelijöiden etäisyyttä laatasta voidaan säätää.

Testilaitteen ohjaus toteutettiin Siemens S7-1200 sarjan logiikalla ja KTP-600 kosketusnäytöllä. Sekoittimen ja rummun moottorit on varustettu taajuusmuuttajakäytöllä, jotta niiden nopeutta voidaan säätää. Ultraäänigeneraattoriksi valittiin suodattimissa vakiona käytettävä Finnsonic FSG-4820 EP -generaattori, jonka nimellistaajuus on 20 KHz. Generaattorin nimellinen ulostuloteho on 4,8 Kw. Koelaitteen sähkö- ja automaatio suunnittelu, sekä logiikkaohjelman kehitys oli myös osa tähän lopputyöhön liittyvää projektia, niitä ei kuitenkaan käsitellä erikseen tässä työssä.



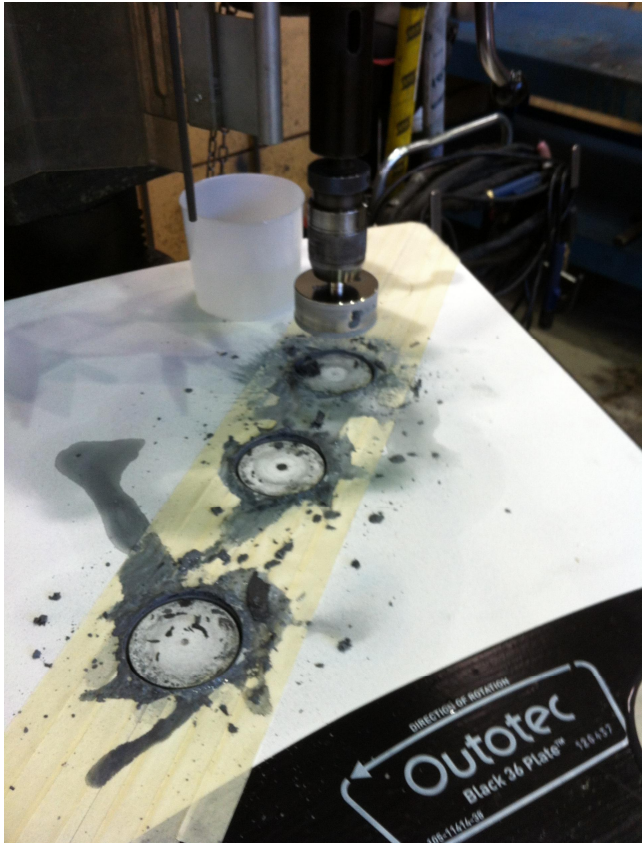
Kuva 17. Ultraäänitestilaitte. Plaanis Oy. 2012.



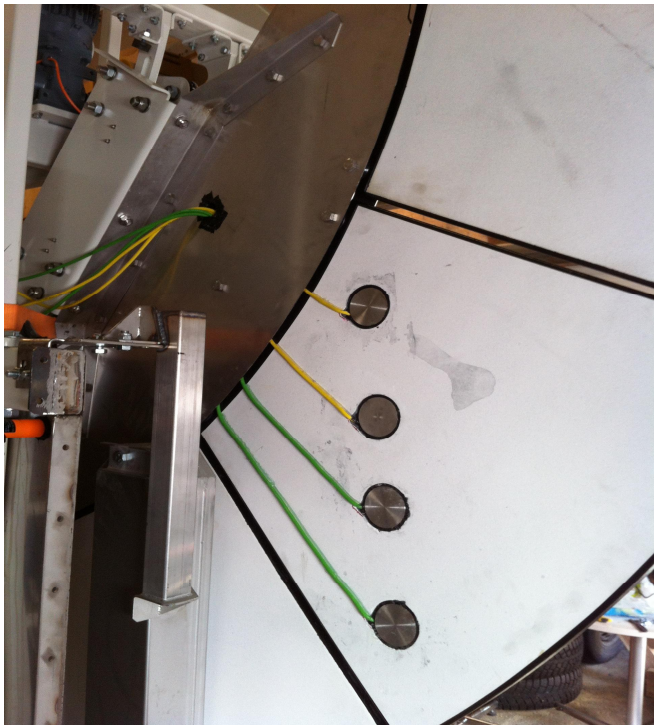
Kuva 18. Laattojen kiinnitys ja sekoitin. Plaanis Oy. 2012.

7.1 Anturilaatan ensimmäinen kehitysversio

Ensimmäisen kehitysversion laataksi valittiin Outotec (Ceramics) Oy:n valmistama standardilaatta. Laatta on rakenteeltaan puristamalla valmistettu, virtauskanavat laatan sisällä muodostuvat ydinkerroksen karkeammasta materiaalista. Antureita varten laattaan porattiin asennusreiät timanttioralla (Kuva 19) ja anturit liimattiin laattaan Sikaflex -221 asennusliimalla. Koeajoissa (Kuva 20) kuitenkin huomattiin, ettei liima ollut tarttunut laatan huokoiseen materiaaliin täydellisesti. Käänteispesun vaikutuksen tutkiminen osoittautui mahdottomaksi anturin reuna-alueiden vuotojen takia.



Kuva 19. Testilaatan valmistus

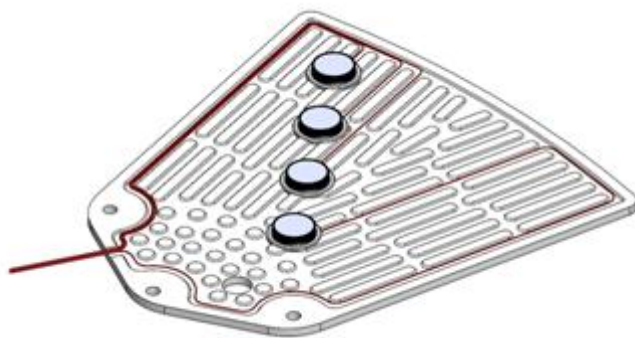


Kuva 20. Ensimmäisen kehitysversion anturilaatta kiinnitettynä testilaitteeseen.

7.2 Anturilaatan toinen kehitysversio

Koska tavoitteena oli kehittää mittausmenetelmä joka soveltuisi mittauksiin tuotantoympäristössä, oli anturikaapeleiden upottaminen laattaan välttämätöntä. Kakun irrotusvaiheessa laatan pinnassa oleva kiintoaine poistetaan kaavareilla, jotka on säädetty noin 1,5 mm etäisyydelle laatan pinnasta. Kaavareista johtuen laatan pinnan täytyy olla tasainen. Laattatyyppiä valittiin tyyppi, joka valmistetaan kahdesta puoliskosta liimaamalla (Kuva 21), näin kaapelit voidaan sijoittaa puoliskojen väliin ennen lopullista kokoonpanoa. Kyseistä laattatyyppiä valmistaa alihankkija, joten anturit lähetettiin Yhdysvaltoihin kokoonpanoa varten. Laattojen, joita tilattiin kaksi kappaletta, toimitusaika osoittautui lopulta yllättävän pitkäksi. Noin puolen vuoden kuluttua laatat (Kuva 22) saapuivat viimein Suomeen.

Laatan rakenteesta johtuen antureiden reuna- alueiden tiivistäminen on helpompaa. Tästä johtuen myös käänteispesun vaikutuksen tutkiminen on mahdollista. Tiivistysliimaus tekee laatasta myös mekaanisesti lujan. Ennen toimivasta laatasta on testattu 8 Bar ylipaineella.



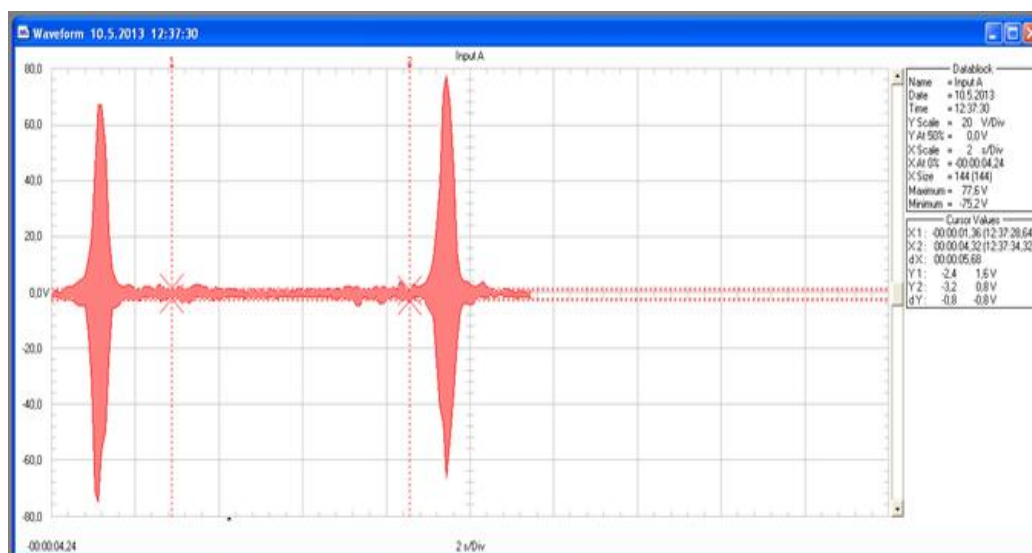
Kuva 21. Anturit kiinnitettyinä laatan puoliskoon. Outotec (Finland) Oy). 2014.



Kuva 22. Anturilaatta asennettuna testilaitteeseen, ultraäänivärähtelijä kuvassa vasemmalla.

7.3 Mittalaitteet ja langaton tiedonsiirto

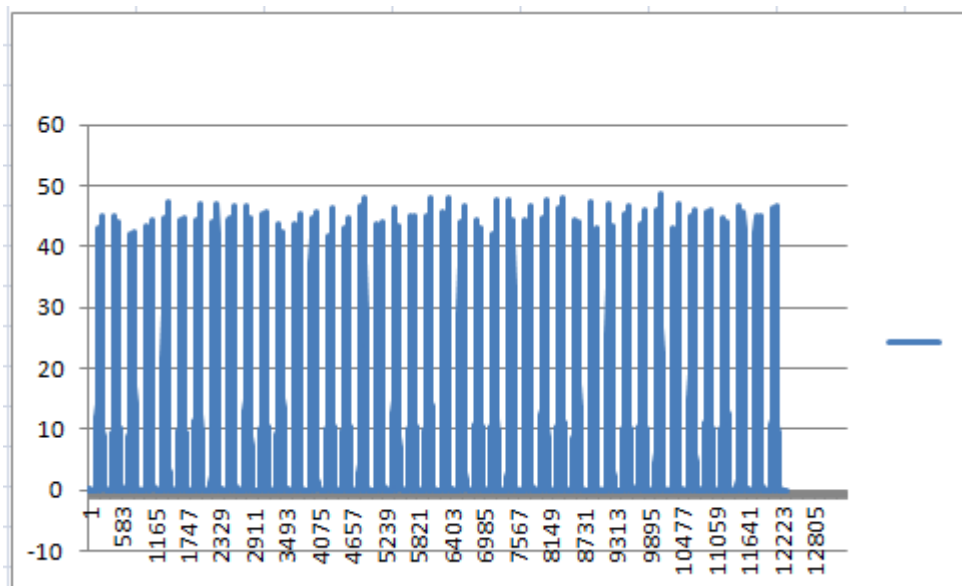
Ensimmäiset mittaukset tehtiin kytkemällä Fluken 125 kannettava oskilloskooppi suoraan antureiden johtimiin. Tiedon tallennukseen käytettiin Fluke View -ohjelmistoa (Kuva 23), jolla mittausdatan pystyi tallentamaan suoraan tietokoneelle. Puutteena ohjelmistossa on datalogger-toiminnon puuttuminen, käytännössä ohjelmalla pystyi tallentamaan ruutukaappauksen oskilloskoopin näytöltä ja tallentamaan sen tietokoneelle.



Kuva 23. Kuvankaappaus FlukeView ohjelmistosta. Kuvassa näkyy kaksi jännitepiikkiä anturi-laatan ohitettua ultraäänivärähtelijän.

Pyörivästä rummista johtuen, mittausten tekeminen tuotantokoon suodattimissa ei ole mahdollista ilman mahdollisuutta siirtää signaalitietoa langattomasti. Langattoman tiedonsiirron tärkein ominaisuus on riittävä tiedonsiirtonopeus ja näytteenottointervalli, jotta pulssin huippuarvoja ei menetetä näytteenoton hitauden vuoksi. Eri toimittajien valikoimista mielenkiinto kohdistui Mantracourtin T24-BSue tukiasemaan ja T24-ACM-VA jännitemittausyksikköön. Kyseinen malli mahdollistaa 200 Hz mittausnopeuden ja 250 Kbit/s tiedonsiirtonopeuden, laitteen toimiessa 2,4 GHz taajuusalueella (Kuva 24).

Koska antureilta ulostuleva noin max. 100 V -jännitesignaali ei sellaisenaan sovi langattomien tiedonsiirtolaitteiden sisääntulojännitteeksi, oli signaalin muokkaaminen standardimuotoon välttämätöntä. Signaalin muokkaamiseksi tilattiin RMS-konvertteri (Kuva 25) Lappeenrannan teknillisen yliopiston elektroniikkasuunnittelun keskukselta. Konvertterilta ulostuleva standardimuotoinen 0-10 VDC -signaali voidaan johtaa langattoman lähettimen sisäänmenoon.



Kuva 24. Anturisiinaali tallennettuna Mantracourt T24 toolkit ohjelmiston datalogger toiminnolla. Mittausaika noin 15 minuuttia. Pystyakselilla signaalivoimakkuus, vaaka-akselilla aika-leimaa vastaava Excelin rivinumero.



Kuva 25. Langattoman tiedonsiirron 0-10 VDC lähetinosa, usb-liitäntäinen tukiasema ja RMS-konverterri.

8 MITTAUKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY

Mittausten avulla pyrittiin selvittämään lietteen kiintoainepitoisuuden, lämpötilan, pyörimisnopeuden ja sekoitusnopeuden vaikutus ultraäänipesutehoon. Ensimmäiset mittaukset tehtiin vedellä lähtötason selvittämiseksi. Generaattoritehoa nostettiin portaittain 12 %, 25 %, 37 %, 50 % ja 75 %. 100 % generaattoritehon käytöstä luovuttiin, koska mittaussignaali ei juuri kasvanut 75 % tehon ylittämisen jälkeen. Sen sijaan 100 % generaattoriteholla ajettaessa kuu-
loalueella olevien hajataajuuksien määrä kasvoi todella häiritseviksi. Laatan liikenopeutta nostettiin portaittain 0 %, 30 %, 60 % ja 100 % vastaten nopeuksia 4 m/min, 5,9 m/min, 7,7 m/min ja 10,3 m/min. Referenssimittaukset ajettiin ensin ilman sekoitusta, ja uudelleen sekoittimen ollessa käytössä. Sekoituksen vaikutusta testattiin sekoittimen nopeuksilla 0 %, 25 %, 50 % ja 75 % vastaten nopeuksia 5, 7, 9 ja 12,5 iskua minuutissa. Yksittäisiä mittapisteitä vesiajojen tuloksista kertyi 2280 kappaletta.

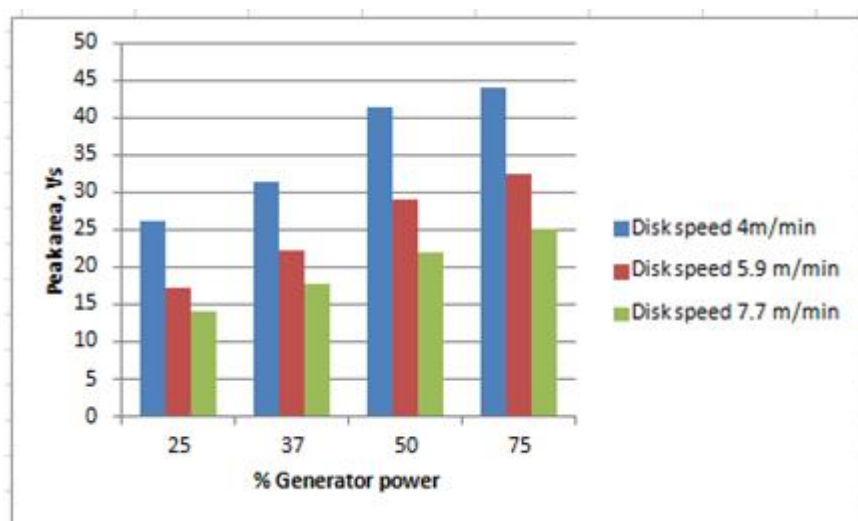
Varsinaisten lietekokeiden aluksi laatan liikenopeus sekä sekoittimen nopeus vakioitiin. Sekoittimen liikenopeus pidettiin mahdollisimman suurena, jotta magnetiittirikasteen raskaat partikkelit pysyisivät mahdollisimman hyvin liikkeessä, eikä rikasteen painumista altaan pohjalle tapahtuisi. Generaattoriteho säädettiin kiinteäksi 50 %. Lietteän kiintoainepitoisuutta nostettiin lisäämällä altaaseen (Kuva 26) magnetiittirikastetta Fe_3O_4 , mittaukset aloitettiin lietteän ominaispainon ollessa 1640 g/l. Kiintoainetta lisättiin kuusi kertaa, päätyen ominaispainoon 2160 g/l. Lietteän ominaispainon saavutettua tavoitearvon liettä lämmitettiin höyrykehittimellä lämpötilan nousun vaikutuksen tutkimiseksi. Mittaukset toistettiin alkuperäisen 18 Celsiusasteen lämpötilan lisäksi 28 C, 35 C, 40 C ja 46 C lämpötiloissa.

Viimeisenä koesarjana tutkittiin pintajännityksen poiston vaikutusta ultraäänipesutehoon. Rautarikastelietteeseen lisättiin natriumlauryylisulfaattia ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$) pintajännityksen poistamiseksi. Kemikaalia lisättiin 100 g erissä kolme kertaa.



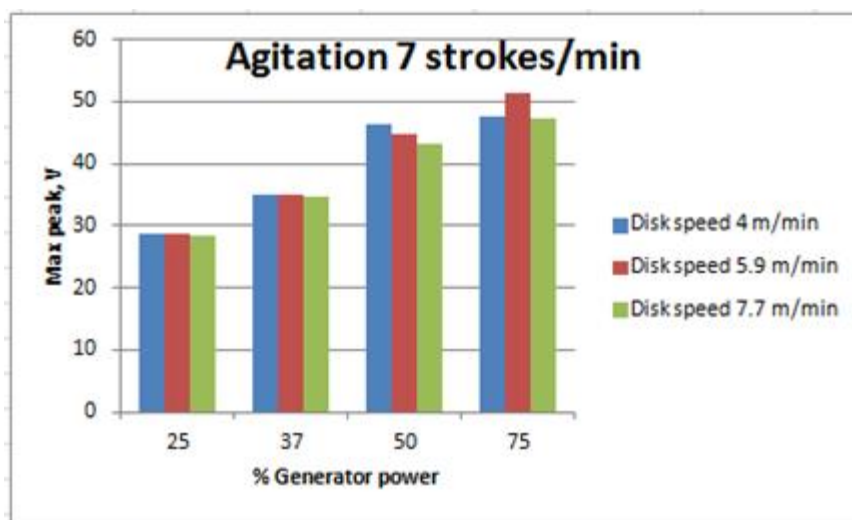
Kuva 26. Magnetiittirikasteen lisäys koelaitteen altaaseen

Seuraava kuvaaja (Kuva 27) esittää generaattoritehon ja rummun pyörimisnopeuden vaikutusta mitattuun pesutehoon. Generaattoritehoa kasvattamalla mitattu signaalivoimakkuus kasvaa lineaarisesti kasvuvauhdin pysähtyessä 75 % generaattoritehon jälkeen.



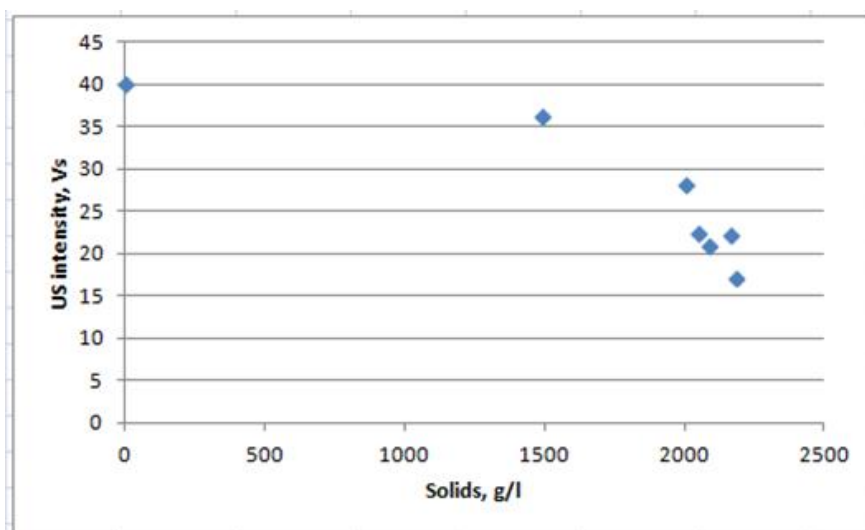
Kuva 27. Pyörimisnopeuden vaikutus mittaussignaalin huippuarvoon eri generaattoritehoilla.

Mittaustuloksista voidaan myös havaita, ettei sekoittimen käytöllä ole juuri-kaan vaikutusta mitattuun signaalivoimakkuuteen (Kuva 28). Sekoittimen vaikutuksen vähäisyys on hieman ristiriidassa yleisesti ultraäänipesuun vaikuttavien tunnettujen tekijöiden kanssa. Sekoittimen aiheuttama liike väliaineessa luo turbulenttiset olosuhteet kavitaatiokuplien muodostumiselle, mikä vaikuttaa pesutulokseen. Sekoittimen vaikutusta tullaan myöhemmin tutkimaan kenttäkokeissa tuotantokoon suodatinlaitteessa.



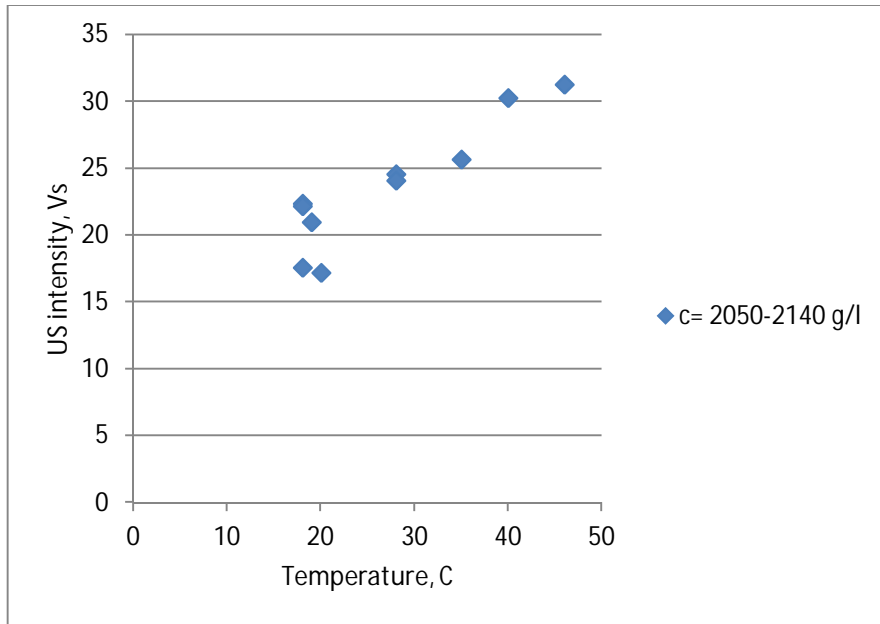
Kuva 28. Mittaussignaali eri generaattoritehoilla sekoitin päälle kytkettynä.

Seuraava kuvaaja (Kuva 29) esittää väliaineen kiintoainepitoisuuden vaikutusta mittaussignaaliin. Kaaviosta voidaan todeta huomattava signaalin lasku väliaineen saavuttaessa 1500 g/l pitoisuuden.



Kuva 29. Väliaineen kiintoainepitoisuuden vaikutus. Pystyakselilla signaalivoimakkuus, vaakakselilla lietteen kiintoainepitoisuus.

Seuraava kuvaaja (Kuva 30) esittää lämpötilan vaikutusta mitattuun pesutehoon. Taulukosta on selvästi havaittavissa signaalivoimakkuuden nousu lämpötilan noustessa. Kasvatettaessa lämpötilaa alkutason 20 Celsiusasteen lämpötilasta 48 Celsiusasteeseen, voidaan havaita signaalivoimakkuuden kasvu noin 17 Vs tasolta noin 32 Vs tasoon. Lämpötilan nousun vaikutus mitaussignaaliin on linjassa yleisesti tunnettujen ultraäänipesuun vaikuttavien tekijöiden kanssa.



Kuva 30. Lämpötilan vaikutus. Pystyakselilla signaalivoimakkuus, vaaka-akselilla väliaineen lämpötila.

9 POHDINTAA

Tämän lopputyön tarkoituksena oli kehittää mittausmenetelmä ultraäänipesutehokkuuden mittaamiseksi. Kokonaisuutta ajatellen työ onnistui hyvin, mittausmenetelmän kehitystyö onnistui vaadittavine lisälaitteineen. Itse varsinaisen rakennustyön aloittamista edelsi mittava tutustuminen ultraäänipesun teoriaan, käytettyihin laitteistoihin sekä niiden oikeaan asennukseen ja käyttöön. Vaikkakin ultraäänipesua ja sen teoriaa koskevia tieteellisiä artikkeleita on runsaasti saatavilla, niissä ei juurikaan käsitellä tilanteita, joissa väliaineena käytettävä neste sisältää suuria määriä kiintoainetta.

Mittauslaitteisto ja sillä suoritettut koeajot vahvistavat yleisesti tunnettuja ultraäänipesuun vaikuttavia tekijöitä. Vesitesteissä generaattoritehon nostaminen näkyi suoraan kasvaneena jännitepulssin huippuarvona, ja rummun pyörimisnopeuden muutos näkyi puolestaan pulssin leveyden muutoksena. Rautarikastekokeissa lietteen kiintoainepitoisuuden kasvattaminen johti mittaussignaalin alenemiseen, lietteen lämpötilan nostaminen puolestaan nosti myös mittaussignaalin tasoa.

Käytetyllä mittalaitteistolla ei kuitenkaan pystytty löytämään eroja mittaussignaalin sekoiintia käytettäessä tai pintajännityksen poistavan kemikaalin lisäyksen jälkeen. Mahdollista on, että käytettyjen antureiden tarkkuus ei ole riittävä noin pienten erojen havaitsemiseen.

Vaikkakin kehitetyllä mittauslaitteistolla pystyttiin mittaamaan ultraäänipesun intensiteettiä Ceramec -suodattimessa, mittauslaitteistoa ei voida pitää yleistyökaluna muunlaisten pesulaitteistojen toiminnan arviointiin. Ceramec suodattimessa puhdistettavien laattojen muoto on vakio ja niiden etäisyys ultraäänivärähtelijöihin on pieni. Värähtelijöiden ja laattojen pienellä etäisyydellä sekä suurella generaattoriteholla pystytään lyhentämään pesuun tarvittavaa aikaa. Pesulaitteistoissa, joissa puhdistetaan erimuotoisia kappaleita, vastaavanlainen optimointi ei ole mahdollista. Edellä mainitut tekijät vaikuttavat myös käytettävään mittauslaitteistoon.

Testilaitteella tehtyjen kokeiden jälkeen mittauslaitteistoa on tarkoitus testata tuotantomittakaavan suodattimessa oikeissa prosessiolosuhteissa. Kenttätestien tarkoituksena on tutkia lieteultrauksen toimintamahdollisuuksia laimentamalla rikastelietettä käänteispesun avulla ja lisäämällä lietteeseen prosessivettä huuhteluputkiston kautta. Tavoitteena on myös tutkia pesussa käytettävän typpihappoliuoksen pH -arvon vaikutus mittaussignaaliin, ja toistaa aiemmin testilaitteella testattu sekoituksen vaikutus mittaussignaaliin.

Kokonaisuutena työ on ollut äärimmäisen mielenkiintoinen sisältäen osa-alueita niin akustiikan, fysiikan, materiaalitekniikan sekä myös sähkötekniikan osalta. Vaikka työ on ollut pitkäkestoinen suunnittelu- ja ideointityön alkaessa jo vuonna 2012, mielenkiinto työtä kohtaan on säilynyt koko prosessin ajan.

LÄHTEET

1. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.
2. Fuchs, F. 2002. Ultrasonic cleaning, fundamental theory and application. Saatavissa: http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning%281%29.pdf [Viitattu 6.9.2015]
3. Atchley, A., Boudjouk, P., Crum, L., Frizzell, L., Rooney, J., Sehgal, C., Shoh, A., Suslick, K., Haar, R., Verrall, R. 1988. Ultrasound. Its chemical, physical, and biological effects. VCH Publishers Inc, s. 1-63.
4. Lamminen, M., Walker, H., Weavers, L. 2004. Mechanism and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738804001978> [Viitattu 13.9.2015]
5. Hesson, J. Fundamentals of ultrasonic cleaning. Saatavissa: <http://www.hesson.com/fundamentals-of-ultrasonic-cleaning.html> [Viitattu 8.11.2015]
6. Fuchs, F. 2002. Ultrasonic intensity measurement techniques. Saatavissa: <http://www.ctgclean.com/tech-blog/wp-content/uploads/Ultrasonic-Intensity-CleanTech-2002.pdf>
7. Knapp, R., Daily, J., Hammitt, F. 1970. Cavitation. McGraw-Hill Book Company, s. 51-132.
8. PI Ceramics GmbH. 2015. Fundamentals of piezo technology. Saatavissa: <http://www.piceramic.com/piezo-technology/fundamentals.html> [Viitattu 1.11.2015]
9. Morgan electro ceramics. Technical publication TP-238, piezoelectricity. Saatavissa: <http://www.morgantechnicalceramics.com/sites/default/files/documents/tp238.pdf> [Viitattu 28.11.2015]
10. Sippola, M., Caloni, K., Karjalainen, J-P., Kortelainen, J., Lehtonen, M., Timperi, A., Vessonen, I., Brander, T., Söderström, P., Kantola, L. 2004. Funktionaalisten materiaalien mahdollisuudet lujitemuovisessa toimirakenteissa. VTT tiedotteita 2250. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2250.pdf> [Viitattu 17.10.2015]

KUVALUETTELO

Kuva 1. Outotec Larox Ceramec. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 2. Kakunmuodostus. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 3. Kuivaussektori. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 4. Kakun irrotus. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 5. Käänteispesu. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 6. Laattojen regenerointi. Outotec (Finland) Oy. 2015. Sisäinen koulutusmateriaali, ei saatavilla.

Kuva 7. Ääniaallon luonne. F. John Fuchs. 2002. Ultrasonic cleaning, Fundamental theory and application. Saatavissa: http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning%281%29.pdf [Viitattu 6.9.2015]

Kuva 8. Kavitaatiokuplan muodostuminen. F. John Fuchs. 2002. Ultrasonic cleaning, Fundamental theory and application. Saatavissa: http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning%281%29.pdf [Viitattu 6.9.2015]

Kuva 9. Kavitaatiokupla ennen romahdusta. Precision cleaning systems. 2015. Saatavissa: <http://www.tmasc.com/basic%20ultrasonic%20cleaning%20procedures.pdf> [viitattu 1.11.2015]

Kuva 10. Kavitaatiokuplan elinkaari. Hesson, J. Fundamentals of ultrasonic cleaning. Saatavissa: <http://www.hesson.com/fundamentals-of-ultrasonic-cleaning.html> [Viitattu 8.11.2015]

Kuva 11. Piettosähköisestä materiaalista valmistettu kiekko. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011. Matine tutkimusseminaari 17.11.2011. Oulun yliopisto.

Kuva 12. Piettosähköinen ilmiö. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011. Matine tutkimusseminaari 17.11.2011. Oulun yliopisto.

Kuva 13. Käänteinen piettosähköinen ilmiö. Leinonen, Palosaari, Sobocinski, Juuti. 2011. Matine tutkimusseminaari 17.11.2011. Oulun yliopisto.

Kuva 14. Sweep toiminnon vaikutus generaattorin lähtötaajuuteen. F. John Fuchs. 2002. Ultrasonic cleaning, Fundamental theory and application. Saatavissa: http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning%281%29.pdf [Viitattu 6.9.2015]

Kuva 15. Pulssitoiminnon vaikutus generaattorin lähtötaajuuteen. F. John Fuchs. 2002. Ultrasonic cleaning, Fundamental theory and application. Saatavissa: http://www.mrclab.com/Media/Uploads/Principles_of_ultrasonic_cleaning%281%29.pdf [Viitattu 6.9.2015]

Kuva 16. Anturi valmiina ennen asennusta laattaan.

Kuva 17. Ultraäänitestilaitte. 2012. Plaanis Oy

Kuva 18. Laattojen kiinnitys ja sekoitin. 2012. Plaanis Oy

Kuva 19. Testilaatan valmistus

Kuva 20. Ensimmäisen kehitysversion anturilaatta kiinnitettynä testilaitteeseen.

Kuva 21. Anturit kiinnitettynä laatan puoliskoon. 2014. Outotec (Finland) Oy

Kuva 22. Anturilaatta asennettuna testilaitteeseen, ultraäänivärähtelijä kuvassa vasemmalla.

Kuva 23. Kuvankaappaus FlukeView ohjelmistosta.

Kuva 24. Anturisignaali tallennettuna Mantracourt T24 toolkit ohjelmiston datalogger toiminnolla.

Kuva 25. Langattoman tiedonsiirron 0-10 VDC lähetinosa, usb-liitäntäinen tukiasema ja RMS-konvertteri.

Kuva 26. Magnetiittirikasteen lisäys koelaitteen altaaseen

Kuva 27. Pyörimisnopeuden vaikutus mittaussignaalin huippuarvoon eri generaattoritehoilla.

Kuva 28. Mittaussignaali eri generaattoritehoilla sekoitin päälle kytkettynä.

Kuva 29. Väliaineen kiintoainepitoisuuden vaikutus mittaussignaaliin.

Kuva 30. Lämpötilan vaikutus mittaussignaaliin.