

TIIVISTELMÄRAPORTTI

PIETSOSÄHKÖISET JA SÄHKÖMAGNEETTISET ENERGIANKORJUUKOMPONENTIT VEDENALAISIIIN SENSORIVERKKOIHIN – PIM-Wave

Jari Juuti, Mikko Leinonen, Jaakko Palosaari, Maciej Sobocinski
Mikroelektroniikan ja Materiaalifysiikan laboratoriot, Oulun yliopisto, PL4500, 90014 Oulu
Puh. 08 553 2714, Email: Jari.Juuti@ee.oulu.fi

Tiivistelmä Projektissa tutkittiin energiankorjuuta pietsosähköisillä ja sähkömagneettisilla materiaaleilla vedenalaisissa olosuhteissa ja kehitettiin useita prototyyppejä sekä aaltoenergian, että virtausenergian korjuuseen. Prototyypeistä yksi soveltuu aaltokeinu tyyppiseen rakentamiseen, yksi virtausenergiankorjuuseen ja 3 aaltoenergian korjuuseen painevaihtelujen kautta. Pietsomateriaalin energiatihedeksi saatiin parhaimmillaan $178 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ virtausenergian ja $30 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ aaltoenergian tapauksessa.

1. Johdanto

Energiankorjuu on tällä hetkellä laajan kiinnostuksen kohteena maailmalla, koska elektroniikan hyödyntäminen uusilla sovellusaloilla vaatii joko uusia akkutekniikoita tai elektroniikan vaatiman energian paikallista tuottamista tai keräämistä ympäristöstä. Viimeksi mainittua tekniikkaa kutsutaan energiankorjuuksi (energy harvesting) tai louhimiseksi (energy mining). Energiaa voidaan "louhia" esim. lämmöstä, valosta, kemiallisista lähteistä, säteilystä ja mekaanisesta värähtelystä. Vedenalaisessa energianlouhinnassa puolestaan pääasiallinen energialähde on aalloista ja virtauksesta syntyvät energiat eli liike-energia. Energiankorjuutekniikoiden kehittäminen on elintärkeää lukuisissa eri sovelluksissa ja sovellusalueiden kasvattamisessa sillä esim. anturiverkkojen toimintavarmuus, älykkyys, monikäyttöisyys, kommunikointi ja lähetysteho ovat voimakkaasti rajoitettuja saatavilla olevan sähköenergian määrään.

Sensoriverkkojen energiantuotannossa on huomioitava sen hinta, tarvittava määrä ja luotettavuus. Suomen olosuhteissa aurinkoenergiaa on saatavilla rajoitetusti minkä lisäksi vedenalaisissa sovelluksissa aurinkopaneelit olisi asennettava pintaan ja niiden olisi kestettävä likaantumatta vaativissa meriolosuhteissa sietäen kosteutta, suolaa ja jäätä jolloin energiantuotto niiden avulla muodostuu äärimmäisen hankalaksi. Tällöin veden virtauksesta ja aalloista saatava mekaaninen energia tulevat harkittaviksi vaihtoehtoiksi joihin tässä tutkimuksessa keskityttiin.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää potentiaalisia ratkaisuja mekaanisen aaltoenergian muuttamiseen sähköenergiaksi mitkä soveltuisivat vedenalaisiin olosuhteisiin. Potentiaaliksi kandidaateiksi todettiin erilaiset sähkömagneettiset ja pietsosähköiset ratkaisut. Molempien komponenttien tapauksessa sensoriverkoille edellä asetetut kriteerit täyttyvät mahdollistaen parhaassa tapauksessa autonomisten ja huoltovapaiden anturijärjestelmien valmistuksen. Lisäksi sähkömagneettisia ja pietsosähköisiä energiamoduuleja voidaan valmistaa edullisesti, missä energiantuotanto voidaan skaalata komponenttien koon ja toimintaperiaatteen mukaan tai monistamalla tarvittava määrä moduuleja. Ne voidaan myös pakata hermeettisesti siten, että kosteus ja suola ei pääse vaikuttamaan niihin samalla kuitenkin muuntaen erilaiset mekaaniset energia (iskut, paineen vaihtelut, muodonmuutokset, liikkeet, jne.) suoraan sähköksi.

Työn käytännön tavoitteena oli valmistaa 1-3 kpl prototyyppiä pietsosähköisiin ja sähkömagneettisiin energiankorjuutekniikoihin perustuen joita voidaan soveltaa aluevalvonta

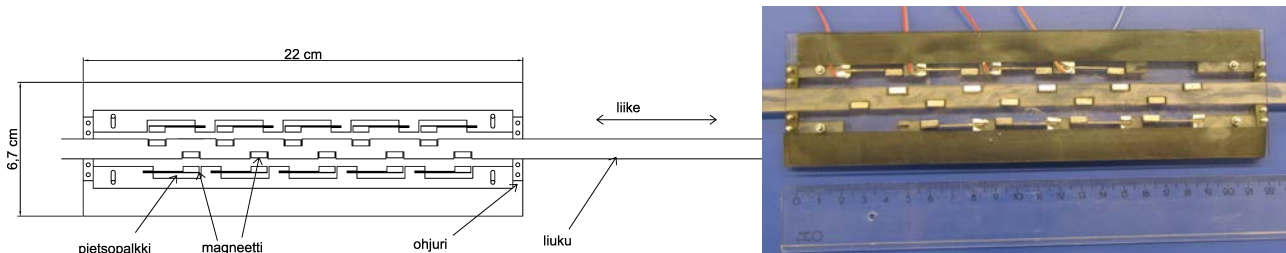
Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite	003701460105
		Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		

tarkoituksiin. Projektin tehtävät sisälsivät suunnittelun, mallinnuksen, valmistuksen (prototyyppi ja materiaalit) ja mittauksen laboratorio ja todellisissa olosuhteissa. Kehitetyt prototyypit toimitetaan tarvittaessa merivoimien tutkimuslaitokselle.

3. Aineisto ja menetelmät

3.1 Aaltokeinu prototyyppi

Ensimmäinen projektissa valmistunut prototyyppi oli aaltokeinu järjestelmään tarkoitettu liukutyypinen komponentti (kuva 1).



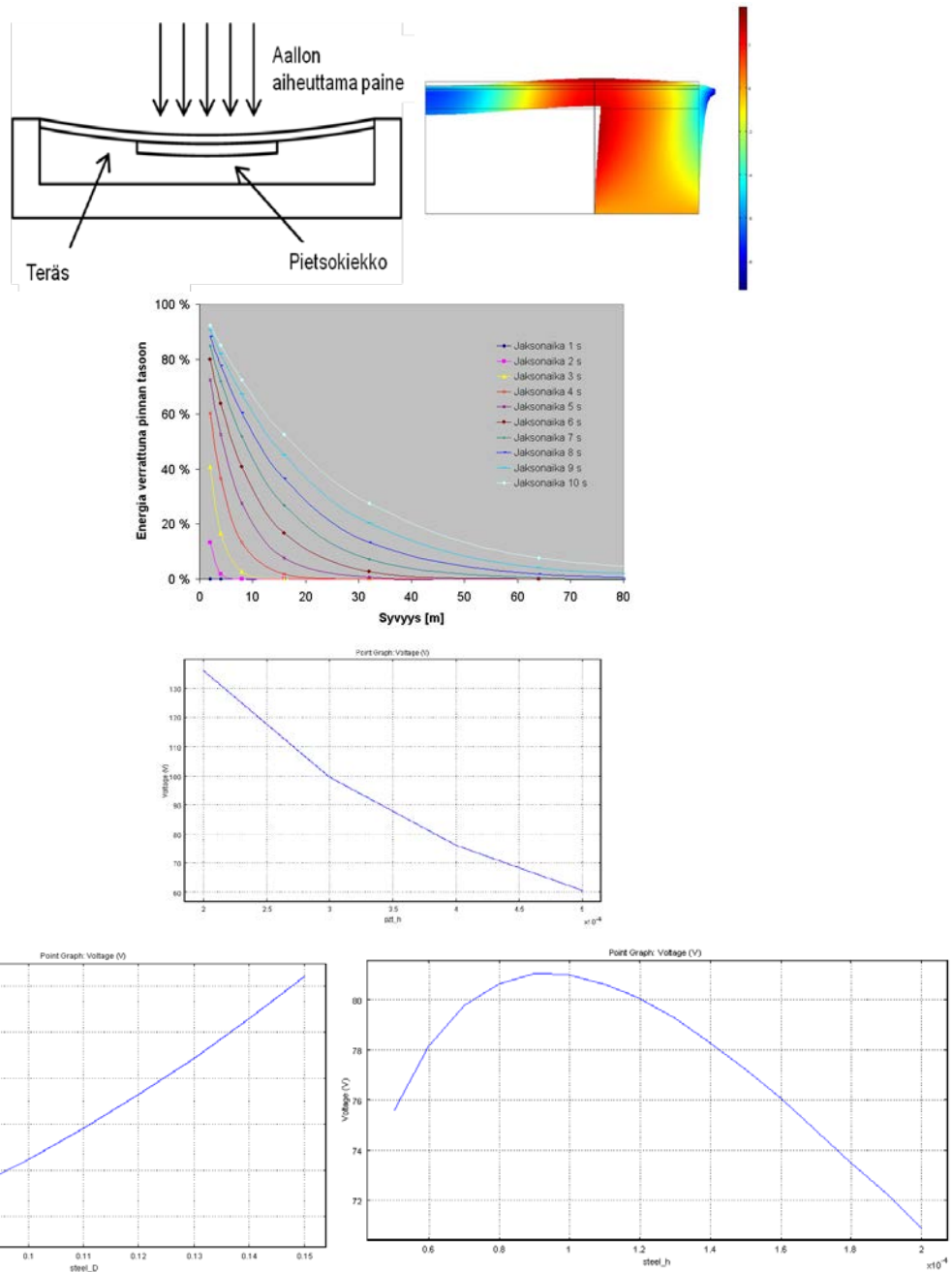
Kuva 1 Aaltokeinu prototyypin a) kaaviokuva b) valmistettu komponentti (220x67x9 mm³)

Prototyyppi koostuu liusta, mihin on kiinnitetty neodyymi magneetteja yhteensä 10 kappaletta ja pietsopalkkeista joihin on kiinnitetty samanlaiset magneetit joiden navat ovat vastakkaiset akselin magneetteihin nähden. Näin magneetit vetävät toisiaan puoleensa ja taivuttavat pietsopalkkeja. Ensimmäisessä prototyypissä magneettien ja pietsopalkkien orientaatiot ovat samat kaikille palkeille ja magneeteille, joten pietsopalkkien sähkövaraukset ovat samantyyppisiä. Myöhemmässä vaiheessa pietsopalkkien polarointisuunnat ja magneettien napaisuuksia muuttamalla on mahdollista tuottaa esimerkiksi kolmivaihevirtaa. Rakenteen etuna on, että pietsojen tuottama energia ei vaadi suoraa mekaanista kosketusta kuten yleensä vaan voima välittyy magneettikenttien kautta jolloin pietso on helposti eristettävissä mm. kosteuden ja suolan vaikutukselta. Lisäksi pitkäaikaista käyttöä ajatellen mekaanista kulumista tapahtuu vain ohjurien ja akselin välillä mikä on paremmin hallittavissa esim. asianmukaisella laakeroinnilla. Projektissa tutkittiin myös kaupallista täysin sähkömagneettista ratkaisua, mutta tässä kokoluokassa ja käytetyillä herätteillä tehon tuotto oli vaatimatonta ja jännitteet eivät nousseet riittävästi ylittääkseen diodisillan kynnysjännitteen. Tästä johtuen tutkimuksessa keskityttiin pietsosähköisiin ratkaisuihin.

Prototyyppi valmistettiin laserleikkaamalla polykarbonaatista, 1,5 mm kerroksia ja näistä kasattiin tarvittavan paksut kerrokset liimaamalla yksittäiset kerrokset yhteen. Komponentin kokonaispaksuudeksi tuli 9 mm. Pietsomateriaalina käytettiin kaupallista PZT-5H materiaalia (Morgan Electro Ceramics, UK) josta valmistettiin 20 x 5 x 0,5 mm³ pietsopalkkeja laserleikkaamalla. Passiivisena kerroksena käytettiin 200 µm terästä, joka toimi myös liimausalusena neodyymi magneeteille (8 x 5 x 3 mm³). Pietsopalkkien etäisyyttä liun magneeteista voidaan säätää liikuttamalla pietsojen kiinnitysalustaa liukuun nähden (kuva 1 b). Kuva valmiista prototyypistä nähdään kuvassa 1 b.

3.2 Teräksiset aaltorumpu prototyypit

Aaltorumpun toimintaperiaate nähdään kuvassa 2 a. Vedenalainen painenvaihtelu, joka voi muodostua esimerkiksi aalloista merellä, kytkeytyy kammion sulkevaan kalvoon joka taipuu hydrostaattisen paineen vallitessa taivuttaen samalla kalvon pintaan kiinnitettyä pietsosähköistä kiekkoa kuten mallinnuksta voidaan todeta (Kuva 2 b). Tämä aiheuttaa pietsosähköisen ilmiön kautta varauksen syntymisen pietson pinnalle. Kalvomateriaaleina voidaan käyttää lähes mitä tahansa materiaalia mikä kestää meriveden ja on yhteensopiva pietson kiinnitysmenetelmän kanssa. Päämääränä oli, että aaltorumpu olisi upotettavissa jolloin aaltojen painenvaihtelusta saatava energia riippuu upotussyvyydestä ja aallonpituudesta joiden vaikutus laskeettiin kuvassa 2 c.



Kuva 2 Aaltorummun a) kaaviokuva b) mallinnettu kalvo ja c) saatavilla oleva energia suhteessa pinnan tasoon syvyyden ja aallon jaksonajan funktiona. Mallinnettu aaltorummun tuottama jännite d) pietsonkeraamin paksuuden, e) teräskalvon halkaisijan ja f) teräskalvon paksuuden funktiona.

Aaltorummun toimintaa ja sen optimointia tutkittiin Comsol multiphysics FEM-mallinnuksen avulla. Kuvissa 2 d-f nähdään eri parametrien vaikutus pietson jännitteen tuottoon ilman kuormaa. Ohuempi pietsonkeraami ja isompi teräskalvo kasvattavat tuotettavaa energiaa (Kuvat 2 d-e), kun optimi teräskalvon paksuus tässä tapauksessa oli 90 μm . Pietsonmateriaalina oli PZT-5H ja kiekon halkaisija ja paksuus olivat 35 mm ja 375 μm . Mallinnoissa teräskalvoon kohdistuu 1 m vesipatsaan paine.

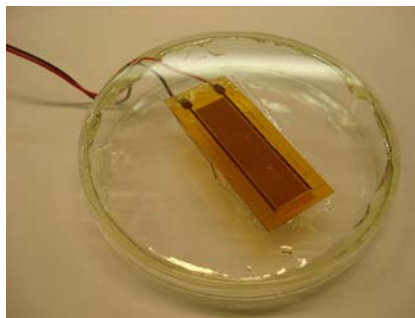
Aaltorumpu prototyypit valmistettiin kiinnittämällä teräskalvot muoviputkien päihin, jolloin yhdessä prototyypissä oli kiinnitettynä kaksi kalvoa ja kaksi pietsoa. Putkien kokoja oli kaksi joista suurempi oli $\text{\O}110$ mm ja pienempi $\text{\O}70$ mm. Pietsomateriaalina käytettiin halkaisijaltaan 35 mm ja paksuudeltaan 375 μm PZT-5H kiekkoja. Suuremmassa prototyypissä käytettiin 200 μm ja 150 μm paksuja teräskerroksia. Pienempään prototyyppiin valittiin puolestaan 150 μm ja 100 μm paksut teräskerrokset. Kuvassa 3 nähdään prototyypin osat ja valmis komponentti.



Kuva 3 a) Aaltorumpu prototyypin osat **b)** valmis $\text{\O}70$ mm prototyyppi.

3.3 MFC aaltorumpu prototyyppi

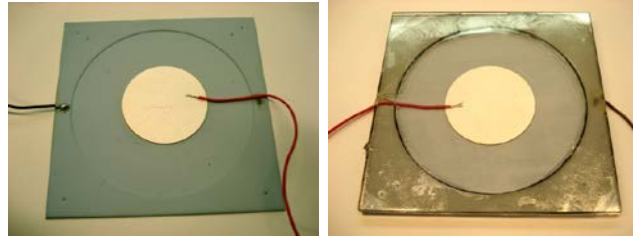
MFC (Macro Fiber Composite) on pietsokomponentti tyyppi, jossa pietsokuituja on asetettu riviin ja niiden päälle on asetettu sormielektrodit. Rakenteesta johtuen komponentin mekaaniset ominaisuudet ovat paremmat (esim. taipuisampi) ja täten mekaaninen sovitus on yleensä helpompaa ja paremmin toteutettavissa. Lisäksi sormielektrodeilla voidaan hyödyntää pietsosähköisen d_{33} -vakion arvoja d_{31} -arvojen sijaan eli tässä tapauksessa kuidut polaroidaan kuitujen suuntaisesti. Prototyypin valmistus tapahtui liimaamalla kaupallinen MFC-komponentti M-4010-P1 (Smart Material Corp. USA) $\text{\O}89$ mm muovikalvoon ja tiivistämällä kansi (kuva 4).



Kuva 4 MFC-prototyyppi.

3.4 LTCC aaltorumpu

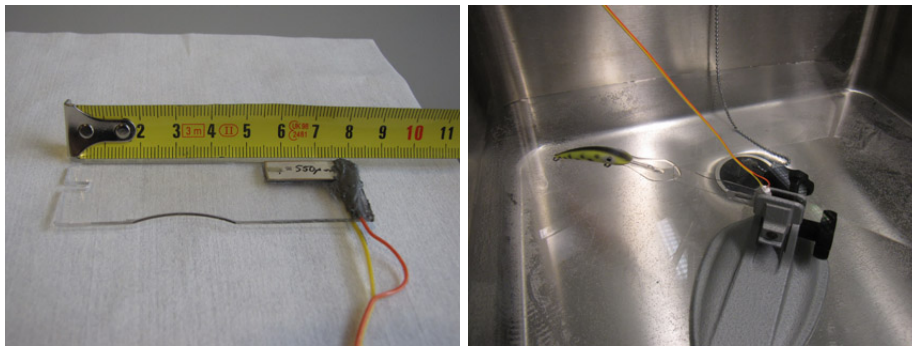
LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic, hermeettinen elektroniikan pakkaus ja liitosalusta materiaali) aaltorumpu valmistettiin pääosin Heraeus Heralock 2000 materiaalista sintraamalla halkaisijaltaan 35 mm ja paksuudeltaan 375 μm PZT kiekko LTCC kalvoon. Kammion kansi valmistettiin polykarbonaatista (PC), mutta rakenne on mahdollista tehdä myös kokonaan LTCC materiaalista, jolloin saadaan aikaan täysin hermeettisesti suljettu rakenne. Komponentin leveys ja pituus olivat 74,5 mm. Valmis prototyyppi nähdään kuvassa 5.



Kuva 5 a) LTCC kammio ja pietso **b)** valmis komponentti jossa kammio suljettu PC kannella.

3.5 Virtaus prototyyppi

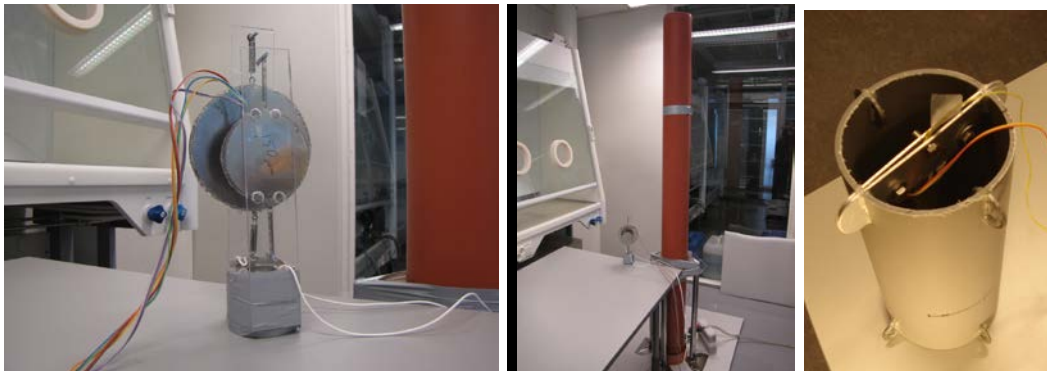
Energian keräämiseksi virtauksesta testattiin yksinkertaista pietson ja kaupallisen uistimen yhdistelmää. Aktiivisena elementtinä oli PZT-5H materiaalista valmistettu palkki, jonka mitat olivat $25 \times 9 \times 0,375 \text{ mm}^3$. Teräs paksuudeltaan $100 \mu\text{m}$ liimattiin pietson toiselle puolelle passiiviseksi kerrokseksi ja komponentti kiinnitettiin 1 mm paksuisen polykarbonaattilevyn ($80 \times 27 \text{ mm}$) päähän mekaanisen sovituksen testaamiseksi. Lopuksi PC levy ja pietso kiinnitettiin uistimen kärkeen, jolloin uistimen liike kytkeytyy levyn kautta pietsoon. Kuvassa 6 nähdään pietso kiinnitettynä polykarbonaattilevyyn ja tämä kiinnitettynä uistimeen.



Kuva 6 a) Polykarbonaattilevy ja pietso **b)** valmis virtaus prototyyppi altaassa.

3.6 Mittausjärjestely ja metodit

Aaltorummut asennettiin upotettavaan mittausalustaan (Kuva 7 a) ja mittaukset suoritettiin vettä täynnä olevassa kuvan 7 b putkessa, johon kuvan 7 a mittausalusta ja aaltorumpukomponentit pudotettiin. Virtausmittauksia varten virtaus prototyyppi kiinnitettiin noin 24 cm pitkään ja $\text{Ø}110 \text{ mm}$ putkeen (kuva 7 c), mikä nostettiin vakionopeudella kuvan 7 b putken sisällä virtauksen generoimiseksi. Tuotetut jännitteet eri mittaustapauksissa mitattiin oskilloskoopilla ja yleismittarilla.



Kuva 7 a) Aaltorumpujen mittausalusta **b)** vedellä täytetty putki johon komponentit upotetaan **c)** virtaus prototyyppin inserttiputki.

Energiankorjauksen elektronikkana käytettiin yksinkertaisinta ja vertailukelpoisinta vaihtoehtoa kirjallisuuden tulosten suhteen. Elektronikka koostuu tasasuuntaajasta ja kondensaattorista (1 μF) sekä joissain tapauksissa vastuksen aiheuttamasta kuormasta kondensaattorin jälkeen.

4. Tulokset ja pohdinta

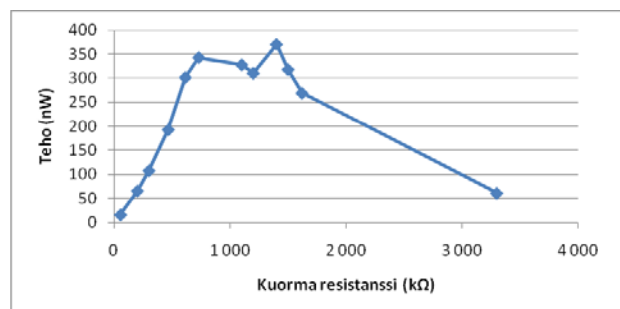
4.1 Aaltokeinu prototyypin mittaustulokset

Ensimmäisenä mittauksena mitattiin kondensaattoriin (1 μF) varautunut jännite akselin syklien funktiona mitkä on esitetty taulukossa 1. Noin 1 V jännite saavutettiin neljällä syklillä mikä vastaa 0,44 μJ energiaa.

Taulukko 1. Energian tuotto syklien funktiona.

Sykli	Jännite (V)	Jännitteen muutos (V)	Energia (μJ)	Energian muutos (μJ)
1	0,29	0,29	0,04205	0,04205
2	0,52	0,23	0,1352	0,09315
3	0,75	0,52	0,28125	0,14605
4	0,94	0,42	0,4418	0,16055

Seuraavaksi mitattiin energian tuotto eri kuormavastuksien arvoilla (Kuva 8). Liukua poikkeutettiin käsin noin 2 Hz taajuudella ja kuormavastus kytkettiin varastokondensaattorin kanssa rinnan. Tulokset nähdään kuvasta 8 mistä huomataan, että maksimiteho saavutetaan noin 800 $\text{k}\Omega$ ja 1600 $\text{k}\Omega$ välillä. Suurin 370 nW teho saavutettiin 1400 $\text{k}\Omega$ kuormalla. Lopuksi teho mitattiin ilman tasasuuntaajaa ja varastokondensaattoria 1400 $\text{k}\Omega$ kuormalla ja tällöin teholumaksi saatiin 1,5 μW . Tämä vastaa 15 $\mu\text{J}/\text{cm}^3/\text{Hz}$ tehotiheyttä aktiiviselle materiaalille. Koska kyseinen tehotiheys edustaa hyvin staattista mekaanisen energian syöttö tilannetta sitä voidaan edelleen kasvattaa aiheuttamalla mm. iskumaisia herätteitä tai rakenteita jotka sallii pietsoelementtien jälkivärähtelyn mikä kyseisessä tapauksessa vaimenee tehokkaasti magneettisen vuorovaikutuksen johdosta.



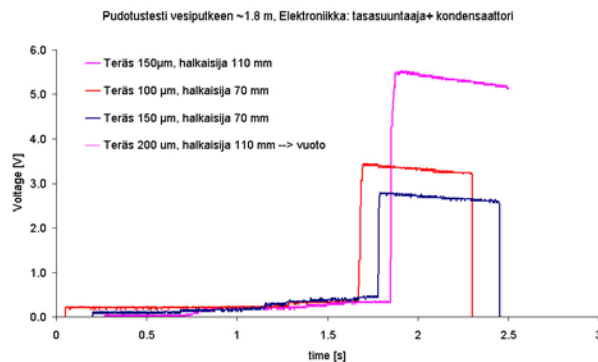
Kuva 8 Teho resistanssin funktiona.

Mittaustuloksien mukaan yhdellä pietsopalkilla saadaan noin 0,75 μW /aalto. Tämä lukema on kuitenkin suhteutettava aalto-oloihin merellä, koska nyt yksi sykli (aalto) vastaa 34 mm liikettä liu-ussa. Eli 0,75 μW teho saavutetaan aallokossa minkä taajuus on 1 Hz ja aallonkorkeus 34 mm. Lisäksi prototyypissä on tällä hetkellä paikat kymmenelle pietsolle, joten tämä luku voidaan kertoa kymmenellä. Oletettaessa esimerkiksi noin 1 m aallonkorkeus (aallonkorkeuden kuukausikeskiarvo 0,6-2 m pohjoisella Itämerellä 2006) niin silloin liuku tekee 29 sykliä ja kymmenellä pietsolla tämä tarkoittaa yhteensä 290 sykliä/aalto ja vastaavasti energiana 218 μJ /aalto. Tämän tehon parantamiseksi liukuun voidaan lisäksi magneettien määrää (maksimi nelinkertainen), jolloin tehoksi saataisiin 885 μJ /aalto. Jos pietsopalkkien määrää myös kasvatetaan (palkit poikittain) niin energia voidaan jälleen nelinkertaistaa (3,5 mJ/aalto). Nämä arvot on laskettu 22x6,7x0,9 cm^3 kokoiselle komponentille mitä voidaan myös vastaavasti kasvattaa. Lisäksi on huomioitava, että pietsojen saatavan energian määrä kasvaa suorassa suh-

teessa pietsosähköisen materiaalin tilavuuteen (mikäli jännitys pysyy samana) jolloin lisää tehoa saadaan kasvattamalla pietsojen paksuutta esim. lisäämällä komponentteja päällekkäin.

4.2 Teräksisten aaltorumpu prototyyppien mittaustulokset

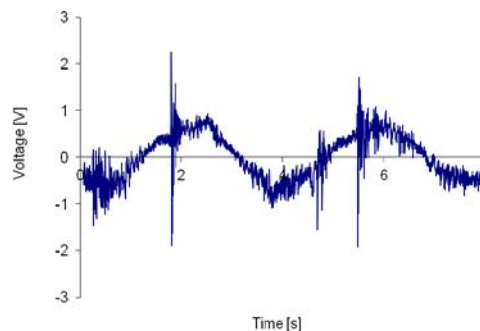
Aaltorumpu prototyypit testattiin pudottamalla ne kuvan 7 b vedellä täytettyyn putkeen. Samalla tarkkailtiin oskilloskoopilla kondensaattoriin varautunutta tasasuunnattua jännitettä. Mittausten tulokset on esitetty kuvassa 9 mistä nähdään, että jännitteen nousu on vaatimaton ennen pohjaan törmäystä, jolloin jännite nousee jopa 5,5 volttiin. Tämä vastaa noin 15 μJ energiaa. On kuitenkin huomattava, että pohjaan törmäys ei vastaa todellista tilannetta merellä. Jos puolestaan lasketaan kondensaattorin latausteho ennen törmäystä, saadaan tehoksi noin 65 nW parhaimmalle prototyypille.



Kuva 9 Kondensaattoriin varautunut jännite ajan funktiona.

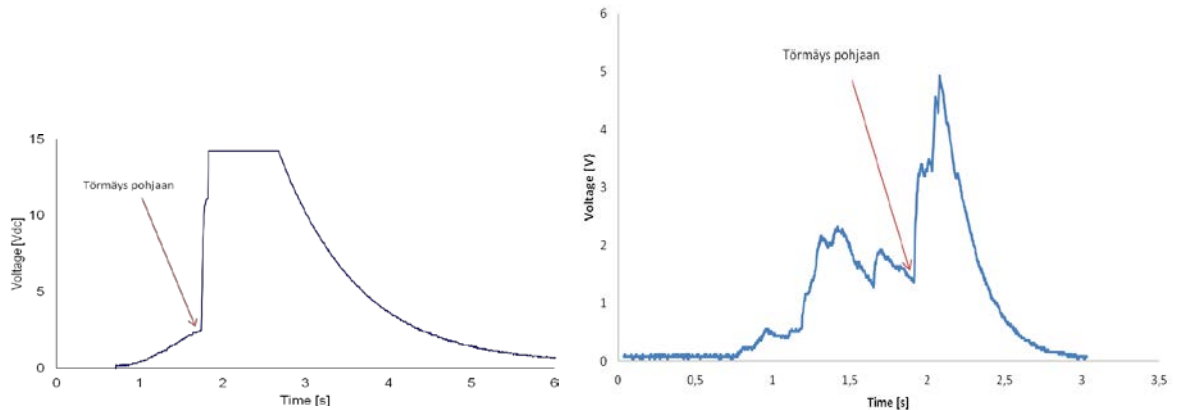
4.3 MFC aaltorumpu prototyypin mittaustulokset

MFC-prototyypit mitattiin samalla tavoin kuin teräksiset aaltorumpu prototyypit upottamalla veteen. Ensimmäisessä mittauksessa mitattiin pietsoon syntyvä jännite puolen metrin huipusta-huippuun amplitudin liikuttelulla veden alla. Painevaihtelu synnytti noin 1 V jännitteen kuten kuvasta 10 nähdään.



Kuva 10 MFC-prototyypin jännite mitattuna suoraan pietsoista $\sim 0,5$ m amplitudilla veden alla.

Seuraavaksi suoritettiin pudotusmittaukset, joiden tulokset on esitetty kuvassa 11 a. Kuvaaja leikkautuu selvästi törmäyksen jälkeen, mikä johtuu oskilloskoopin asetuksista. Toisella mittauksella törmäyspiikin suuruudeksi mitattiin 17 V, mikä vastaa 144 μJ energiaa. Kondensaattoriin latautuu ennen törmäystä noin 2,3 V jolloin latausteho on noin 3,1 μW ja pietsomateriaalin tehoiheys 25,8 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ sekä kondensaattoriin latautunut energia 2,5 μJ . Tämä siis noin 1,8 m vesipatsaan muodostamalla paine-erolla.

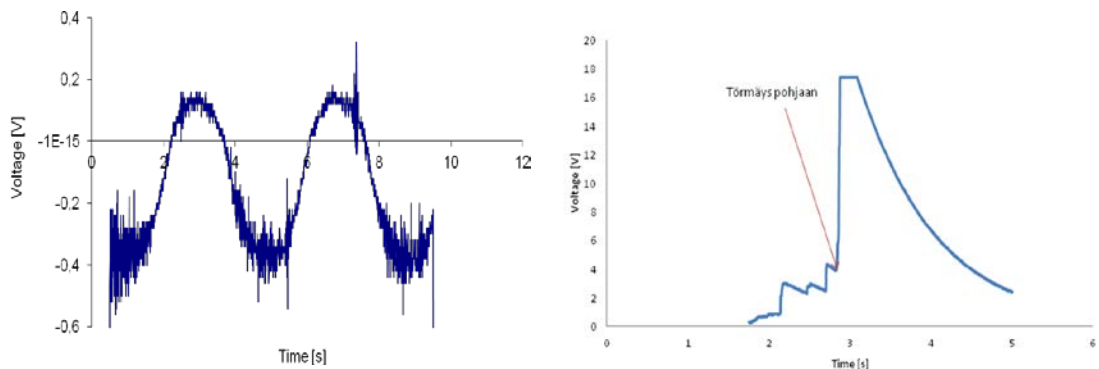


Kuva 11 a) MFC-aaltorummun pudotuskoe, kondensaattoriin varautunut jännite ajan funktiona. **b)** Pudotusmittaus 200 k Ω vastus kondensaattorin rinnalla.

Seuraavaksi tasasuuntaajan ja kondensaattorin kuormaksi asetettiin 200 k Ω vastus, jolloin voitiin tutkia komponentin tuottamaa tehoa pelkän lataustehon sijaan. Kuvaajassa 11 b nähdään pudotusmittaus vastuksen kanssa jolloin välillä 1,3 – 2,0 s on virrantuotto suurimmillaan. Tällöin tehoksi laskettiin keskimäärin 12 μ W ja pietsomateriaalin tehotiheyden ollessa noin 100 μ W/cm³.

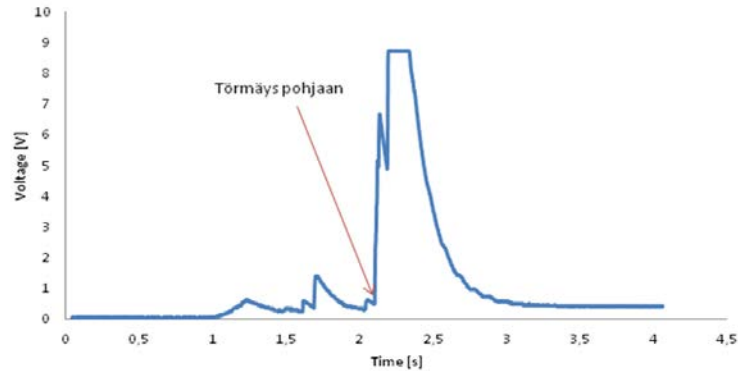
4.4 LTCC aaltorumpu prototyypin mittaustulokset

LTCC prototyypille suoritettiin vastaavat mittaukset kuin MFC prototyypille. Ensimmäisenä mittauksena oli 0,5 m huipusta-huippuun amplitudilla tapahtunut liikuttelu vedessä ylös- alas. Kuvaajasta 12 nähdään pietsoon syntynyt jännite ja kuten huomataan jännitteen amplitudi on vain noin 230 mV verrattuna MFC prototyypin noin 1 voltin jännitteeseen samoissa olosuhteissa.



Kuva 12 a) LTCC prototyypin jännite noin 0,5 m huipusta-huippuun amplitudilla. **b)** LTCC prototyypin kondensaattorin tasasuunnattu jännite pudotustestissä.

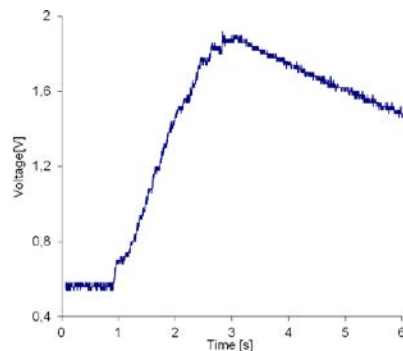
Kuvassa 12 b on esitetty kondensaattoriin latautunut jännite ajan funktiona. Keskimääräinen latausteho oli 6,8 μ W ja kondensaattoriin latautuu noin 3,9 V jännite vastaten 7,6 μ J energiaa ennen törmäystä. Kuvassa 13 nähdään 200 k Ω :lla kuormitetun kondensaattorin jännite. Tästä voidaan laskea keskimääräinen latausteho ajalle 1,0 – 2,3 s joka on noin 2 μ W jolloin tehotiheys pietsomateriaalille oli 5,5 μ W/cm³.



Kuva 13 Kondensaattorin jännite kuormitettuna 200 k Ω vastuksella.

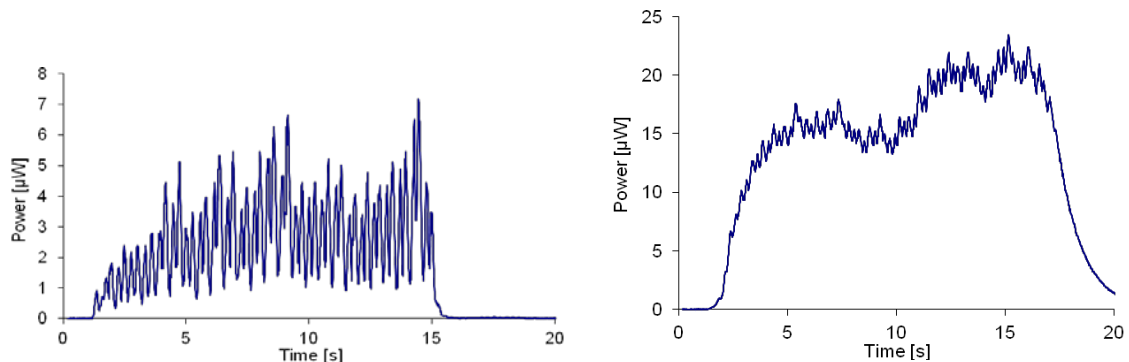
4.5 Virtaus prototyypin mittaustulokset

Virtaus prototyypille suoritettiin virtausmittaukset nostamalla kuvan 7 c inserttiä, jonka sisälle prototyyppi kiinnitettiin, kuvan 7 b putkessa. Nostonopeus oli noin 1,1 m/s eli tämä on keskimääräinen virtaus, joka prototyyppiin kohdistuu. Kuvassa 14 nähdään kondensaattorin latautuminen mistä laskettiin tehoksi noin 0,58 μ W jolloin lataustehon tuotto normalisoituna virtaukseen on noin 0,53 μ W/(m/s). Tehotiheydeksi pietsomateriaalille ja koko komponentille saatiin 4,4 μ W/cm³ 1 m/s virtauksella.



Kuva 14 Virtaus prototyypin tasasuunnattu jännite kondensaattoriin.

Varsinaisten virtausmittausten lisäksi tehtiin tehontuoton mittauksia eri kuormilla altaassa missä aallot kytkeytyivät virtaus prototyyppiin sivusuunnassa ja pituus suunnassa. Näin pyrittiin saamaan selville prototyypin potentiaali ideaalisemmassa virtaustapauksessa. Tulokset nähdään kuvassa 15, jossa on kaksi ääripäätä kuormitusvastusten suhteen. Optimaalisella kuormalla generoitiin noin 20 μ W ja optimoimattomalla kuormalla vain noin 3 μ W vastaten 178 μ W/cm³ ja 27 μ W/cm³ tehotiheyksiä pietsomateriaalille. Tehoja voidaan kasvattaa edelleen huomattavasti kasvattamalla pietsonrakenteen kokoa, siihen kohdistuvaa kuormitusta ja erityisesti kuormitus syklien taajuutta (aallon taajuus mittauksissa noin 1 Hz) säätämällä virtauksen voiman kohdistavan "uistimen" virtausdynamiikkaa. Tällöin samanlainen kuormitus esim. 5 Hz taajuudella, 10x10x0.05 cm³ pietsokomponentilla ja optimi kuormalla tuottaisi noin 4,5 mW.



Kuva 15 a) Tehontuotto 106 kΩ vastukseen ja b) tehontuotto 2,3 MΩ vastukseen.

4.6 Yhteenveto

Aaltoenergiaa keräävien prototyyppien energian tuotot / aalto 1 m aallonkorkeus oletuksella on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Aaltoenergian keräimien energian tuotto / aalto.

Prototyyppi	Energiaa / aalto [μJ]	Tehotiheys aktiiviselle materiaalille [$\mu\text{W}/\text{cm}^3$]
Aaltokeinu	219	30
Teräksinen aaltorumpu	0,057	0,18
MFC-aaltorumpu	2,8	25,8
LTCC-aaltorumpu	8,4	5,5

On huomattava, että tutkimuksessa käytetty elektroniikka on valittu tulosten vertailtavuuden kannalta, kun puolestaan monimutkaisemmat järjestelmät kuten kirjallisuudessa esitetyillä SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor) ja DSSH (Double Synchronized Switch Harvesting) järjestelmillä kerättyä energiaa/tehoa kyetään kasvattamaan 500 % asti verrattuna yksinkertaiseen tasasuuntaukseen. Kyseisten piirien toimivuudesta tämän tutkimuksen kaltaisissa herätteissä ei kuitenkaan ole vielä toistaiseksi tietoa.

Taulukkoon 3 on kerätty muutamia kaupallisia anturi ja kommunikointi ratkaisuja ja niiden tehonkulutuksia sekä tässä työssä toteutettujen energiankeruu komponenttien tehoja skaalattuina isommiksi komponenteiksi. Kuten nähdään varsin pienikokoisten energiankeruumoduulien tehontuotto on riittävällä tasolla yksittäisten anturien ja modeemien ja myös harvakseltaan käytettävän radion tapauksessa. Huomattavaa kehitystyötä kuitenkin tarvitaan vielä kokonaisten järjestelmien ylläpitoon missä tehoja kuluu useita watteja.

Taulukko 3. Aaltoenergian keräimien energian tuotto / aalto.

Laite	Teho	Lisätietoja	Valmistaja
H1b passiivinen piezo hydrofoni	0 W	Ei esivahvistinta/bufferia	Aquarion Audio Products
H2b hydrofoni	0.3 mA	Sisäänrakennettu esivahvistin, vaatii bias jännitteen, max syvyys 80 m	Aquarion Audio Products
UWM1000, akustinen modeemi	1/0,75/0,008W (TX/RX/sleep)	17.8 kbits/second, max syvyys 200 m	LinkQuest Inc.

SR-100, akustinen modeemi + vapautusmekanismi	34 mW	360 BPS, max 6000 m, käyttöaika 2 v (alkaline 588 W · t)	Teledyne Benthos
RLX-IFH9E, hyppivätaajuuksinen radio 900 MHz	0,1-1 W hetkel. max 12 W)	Max kantama 48 km, 1.1 Mbaud (128 AES kryptaus)	ProSoft Technology
Wideband Acoustic Measurement System	7,3 W	VHF (1 W), UHF, hydrofoni, käyttöaika 48 t	High Tech Inc.
Magneetti-pietsokeraamihybrid	3,5 mW	22x6,7x0,9 cm ³ , pinnassa 1 m aallonkorkeus T= 1 s	
Pietsosähköinen aaltorumpu (MFC)	60 mW 20 mW	Ø36x1 cm 10 x 2-puoleinenkalvo, 1.8 m aallonkorkeudella T=10 s pinnassa ja 30 m syvyydessä	
Virtaus prototyyppi	4,5 mW	5 Hz, 10x10x0.05 cm ³ pietsokomponentti	

5. Loppupäätelmät

Eri prototyypeistä virtaukseen perustuva harvesteri vaikuttaa lupaavimmalta vaihtoehdolta materiaalin tehotiheyden, tehon ja materiaalin kulutuksen kannalta. Näitä arvoja voidaan edelleen parantaa huomattavasti optimoimalla rakennetta sekä kasvattamalla laitteen kokoa ja kuormitusyklejä. Lisäksi rakenteessa ei ole varsinaisia kuluvia osia ja siitä voidaan tarvittaessa tehdä akustisesti huomaamaton aluevalvontasovelluksia ajatellen. Paikkoihin missä virtaus on hyvin vähäinen voidaan käyttää aaltorumpu periaatetta missä erityisesti MFC perustuva ratkaisu osoittautui hyvin potentiaalisesti vaihtoehdoksi (MFC rakennetta voidaan hyödyntää myös virtaukseen perustuvassa ratkaisussa). Projektissa tutkittiin myös sähkömagneettista ratkaisua, mutta tässä kokoluokassa ja käytetyillä herätteillä suorituskyky oli heikko. Tämä tekniikka voi kuitenkin osottautua potentiaalisesti vaihtoehdoksi suuremmassa mittakaavassa. Aaltorummun tehoa voidaan skaalata huomattavasti suuremmille tehoaluille mutta sijoituspaikan olosuhteet (paine, syvyys, aallon jaksonaika) täytyvät olla tarkkaan tiedossa rakenteiden suunnitteluvaiheessa (esim. rummun esipaineistuksen suunnittelu). Kaiken kaikkiaan toteutetut rakenteet voidaan skaalata riittäville tehotasoille yksittäisten anturien, akustisten modeemien tehontarpeisiin mutta varsinaisten järjestelmien tehontuottoon tarvitaan vielä huomattavaa lisätutkimusta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Kansainvälistä tieteellistä julkaisua valmistellaan Sensors and Actuators lehteen.