



Aaltoenergiakeräimen pienoismallin pikamallinnus ja sen toiminnan tarkastelu aaltoaltaassa

Konsta Kilponen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2015
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

KONSTA KILPONEN:

Aaltoenergiakeräimen pienoismallin pikamallinnus ja sen toiminnan tarkastelu aaltoal-
taassa

Opinnäytetyö 56 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Toukokuu 2015

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli valmistaa Tampereen ammattikorkeakoululla toimivaa kaupallisen kynnyksen ylittävän aaltoenergiakeräimen valmistushanketta varten pienoismalli suunnitellusta keräimen rungosta. Pienoismallia käytettiin aaltoallaskokeidein suorittamiseen, joiden tarkoituksena oli konseptin toimintaedellytyksien varmistamisen erilaisissa aallokoissa. Pienoismallin valmistusta varten perehdyttiin pikamallinnukseen käsitteenä ja valmistusmenetelmänä kirjallisuutta hyväksi käyttäen. Samalla selvitettiin pikamallinnuksen tuomia mahdollisuuksia tuotekehitysprosessiin. Työssä on käsitelty seikkaperäisesti pienoismallin suunnittelutyö, suunnittelun lähtökohdat sekä valmistaminen.

Työn tuloksena saatiin valmistettua pienoismalli sekä tietoa laitteen toiminnasta, joita kumpaakin aaltoenergiakeräinhankkeen työryhmä voi hyödyntää keräimen jatkokehityksessä. Aaltoallaskokeiden perusteella laitteen konsepti todettiin toimivaksi ratkaisuksi.

Aaltoallaskokeisiin käytetyn aaltoaltan aallontuotto- ja vaimennuskyky todettiin työn aikana heikoiksi. Kattavampien ja tarkempien kokeiden suorittamista varten aaltoallasta tulisi kehittää.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical and Product Engineering
Product Development

KONSTA KILPONEN:

Producing a Scale Model of a Wave Energy Converter by Rapid Prototyping and Testing Its Functioning in a Wave Tank

Bachelor's thesis 56 pages, appendices 0 pages

May 2015

The purpose of this thesis was to design and produce a scale model of a wave energy converter which is under development in Tampere University of Applied sciences and perform several tests for it in a wave tank. The scale model was produced using a rapid prototyping technology. The main objective was to gather information about the scale model's functioning in conjunction with different wave types in order to confirm for the functionality of the shape and mechanism used in the design. The theoretical section explores wave energy and rapid prototyping in general. The benefits of rapid prototyping in product development process are also explained.

As a result of this study the design for the wave energy converter was confirmed to be functional, so the development of the device can be continued. For more accurate and comprehensive results of the device's functioning, the wave tank should be developed further, due to its weak wave attenuation and wave production abilities.

Key words: wave energy, rapid prototyping, additive manufacturing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	AALTOENERGIA	7
2.1	Katsaus eri energialähteiden käyttöön maapallolla	7
2.2	Aaltoenergian syntyminen ja aaltoliikkeen teoria.....	7
2.3	Aaltoenergian määrä maapallolla	9
2.4	Aaltoenergian keräämismenetelmät.....	10
2.5	TAMK:in aaltoenergiakeräin	12
3	PIKAMALLINNUS	14
3.1	Käsitteen määrittely	14
3.2	Pikamallinnusprosessin peruskuvio	16
3.2.1	CAD-tiedoston valmistaminen.....	16
3.2.2	STL-tiedostoksi muuntaminen	16
3.2.3	Tiedoston siirtäminen pikamallinnuslaitteelle	17
3.2.4	Laitteen asetusten valikoiminen.....	17
3.2.5	Kappaleen valmistaminen	18
3.2.6	Kappaleen irrottaminen laitteesta (ja puhdistaminen).....	18
3.2.7	Jälkikäsitely.....	18
3.2.8	Valmiin kappaleen soveltaminen käyttöön	19
3.3	Pikamallinnustekniikat.....	19
3.3.1	Stereolitografia (SLA).....	21
3.3.2	Selective laser sintering (SLS).....	22
3.3.3	Fused deposition modeling (FDM)	24
4	PIKAMALLINNUS OSANA TUOTEKEHITYSTÄ.....	26
4.1	Tuotekehitys-käsitteen määrittelemine	26
4.2	Tuotekehityksen uudenlaiset haasteet.....	27
4.3	Pikamallinnuksen tarjoamat edut tuotekehitysprosessiin	31
4.3.1	Mallien käyttämisellä saavutettavat edut	31
4.3.2	Pikamallinustekniikan nopeuden mahdollistamat hyödyt.....	31
5	PIENOISMALLIN VALMISTAMINEN	34
6	AALTOALLASKOKEET	43
6.1	Yleistä aaltoallaskokeista.....	43
6.2	Aaltoallas	43
6.3	Koejärjestelyt ja lähtökohdat	47
6.4	Toteutus	48
6.4.1	Juoksupyörä mahdollisimman lähellä akselia	52

6.4.2	Juoksupyörä kiskon keskikohdassa.....	52
6.4.3	Juoksupyörä mahdollisimman kaukana akselistä	53
6.4.4	Muita huomioita.....	53
6.5	Yhteenveto	54
7	POHDINTA.....	55
	LÄHTEET.....	56

1 JOHDANTO

Maailman merissä on valtava määrä energiaa sitoutuneena aaltoihin. Tätä energiaa ei kuitenkaan vielä ole saatu valjastettua käyttöön tarpeeksi kustannustehokkaalla tavalla, jotta sen hyödyntäminen maailman energiantuotannossa olisi kannattavaa. Monia erilaisia aaltoenergian keräysmenetelmiä on kehitelty ja myös koekäytetty, mutta useimpien sovellusten aiheuttamat käyttöönotto- ja perustamiskustannukset ovat olleet niin mittavia verrattuna niiden tuottamaan energianmäärään, ettei aaltoenergiavoimoihin sijoittamista ole nähty kannattavaksi. Tällä hetkellä aaltoenergian tutkiminen uusiutuvan energian tuotannossa onkin jäänyt hieman tuuli- ja aurinkovoiman varjoon, mutta se kasvattaa koko ajan enemmän kiinnostusta.

Tampereen ammattikorkeakoulussa on pyritty jo vuosia kehittämään kaupallisen kynnyn ylittävää aaltoenergiakeräintä osana tutkimus- ja innovaatio toimintaa. Tämä aaltoenergialaitteen tuotekehitys on edennyt siihen vaiheeseen, että suunnittelutyön tuloksena syntyneestä aaltoenergiakeräimen konseptista tarvittiin pienoismalli aaltoallas-kokeita varten. Tämä opinnäytetyö käsittelee tuon pienoismallin valmistamista pikamallintekniikkaa hyväksikäyttäen sekä valmiille pienoismallille suoritettavia aaltoallas-kokeita.

Työn tavoitteena on saada kerättyä tietoa aaltoenergialaitteen konseptin toimivuudesta aallokossa pienoismallia ja aaltoallasta hyödyntäen. Valmistettavaa pienoismallia voidaan myöhemmin käyttää konseptin eteenpäin esittelemiseksi.

Opinnäytetyön alussa perehdytään aaltoenergian muodostumiseen ja sen keräämiseen käytettäviin yleisimpiin menetelmiin, esitellään TAMK:in aaltoenergialaitteen konseptin pääpiirteet ja tutustutaan yleisesti pikamallintamiseen sekä sen käyttämiseen osana tuotekehitysprosessia. Seuraavaksi käydään läpi pienoismallin suunnittelu, mallinnus ja valmistaminen. Tämän jälkeen siirrytään pienoismallille suoritettavien aaltoallaskokeiden valmisteluun ja toteuttamiseen. Lopuksi kootaan yhteen työn tulokset.

2 AALTOENERGIA

2.1 Katsaus eri energialähteiden käyttöön maapallolla

Fossiilisten polttoaineiden, kuten kivihiilen, öljyn ja maakaasun, rajallisten varantojen määrän maapallolla sekä ilmastonmuutoksen haitallisten vaikutusten vuoksi on pyritty kehittämään erilaisia uusiutuvia energialähteitä hyväksikäytettäviä energian tuotantomuotoja. Uusiutuviksi energialähteiksi luokitellaan vesivoima, tuulivoima, biopolttoaineet, biokaasu, aurinkovoima, geoterminen energia sekä aalto- ja vuorovesivoima. (Combar-nous & Bonnet 2008, 5-7.)

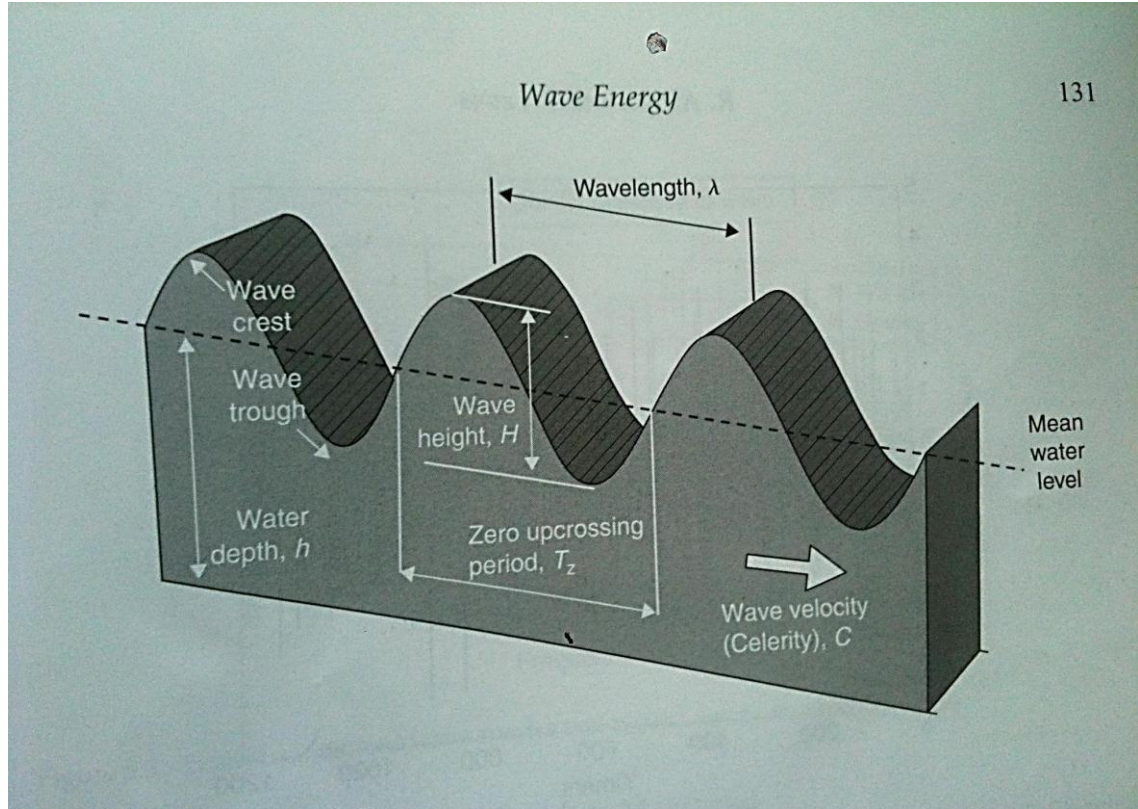
Vuoden 2000 kulutuksen tasolla mitattuna maakaasuvarannot riittävät arviolta noin 50 vuodeksi, todennetut kerättävissä olevat öljyvarannot arvioilta noin 40-50 vuodeksi ja kivihiilivarannot muutamaksi vuosisadaksi. Fossiilisten polttoaineiden käyttö aiheuttaa suurimmat ihmisen toiminnasta johtuvat hiilidioksidipäästöt maapallolla täten kiihdyttäen ilmaston lämpenemistä. (Combar-nous & Bonnet 2008, 5-7.)

Tällä hetkellä maapallolla tuotetusta kokonaisenergiämäärästä on noin 10-20 prosenttia lähtöisin uusiutuvasta energiantuotannosta. Loput tuotetaan fossiilisten polttoaineiden ohella ydinvoimalla. (Combar-nous & Bonnet 2008, 5-7.)

2.2 Aaltoenergian syntyminen ja aaltoliikkeen teoria

Aaltoenergialla tarkoitetaan merien ja muiden vesistöjen aaltoihin sitoutunutta energiaa. Tämä energia on peräisin auringosta: Aurinko aiheuttaa lämpötilaeroja ympäri maapalloa, mikä aiheuttaa tuulia, jotka puhaltavat merien pinnalla. Tämä aiheuttaa väreitä, jotka kasvavat aalloiksi. Tällaiset aallot voivat kulkea tuhansia kilometrejä menettämättä käytännössä lainkaan energiaansa. Aallon energiatiheys on paljon suurempi kuin tuulitai aurinkoenergialla. Kun aalto lähestyy rantaa, sen nopeus hidastuu, mikä saa aallonpituuden lyhentymään, jolloin aallonkorkeus kasvaa, mikä aiheuttaa aallon hajoamisen. Pääsääntöisesti energiaa häviää huomattavia määriä aallon hajoamisen ja meren pohjan kitkan johdosta, minkä vuoksi vain murto-osa potentiaalisesta energiavarannosta kulkeutuu rantaan asti. (Cruz 2008, 1.)

Aaltoliikettä voidaan kuvata yksinkertaisesti kuvion 1 mukaisella aallolla, jossa aallolla on tietyn suuruinen aallonkorkeus (*waveheight*, H) ja aallonpituus (*wavelength*, λ), sekä aallonharjojen välinen jaksonaika (*period*, T) on tasainen. (Raymond & Lewis 2008, 130.)



KUVIO 1. Aallon määrittely ja sitä kuvaavat suureet (Raymond & Lewis 2008, 131)

Tällaisessa tasaisessa vaimenemattomassa aallossa sen sisältämä energia on verrannollinen aallonkorkeuden neliöön ja aallonpituuden neliöön. Syvässä vedessä tämä energia on jakautunut tasaisesti liikkuvan pinnan potentiaalienergiaksi ja vedenalaisten vesipartikkelien liikkeestä syntyväksi kineettiseksi energiaksi. Tulee huomata, että aaltoliike on liikkuva energiapakkaus, eivätkä vesipartikkelit liiku aallon mukana. Vain energia välittyy veden kautta. (Raymond & Lewis 2008, 130-131.)

Aallon siirtämän energian määrästä voidaan muodostaa kaava (1), josta saadaan tulokseksi aallon teho metriä kohden:

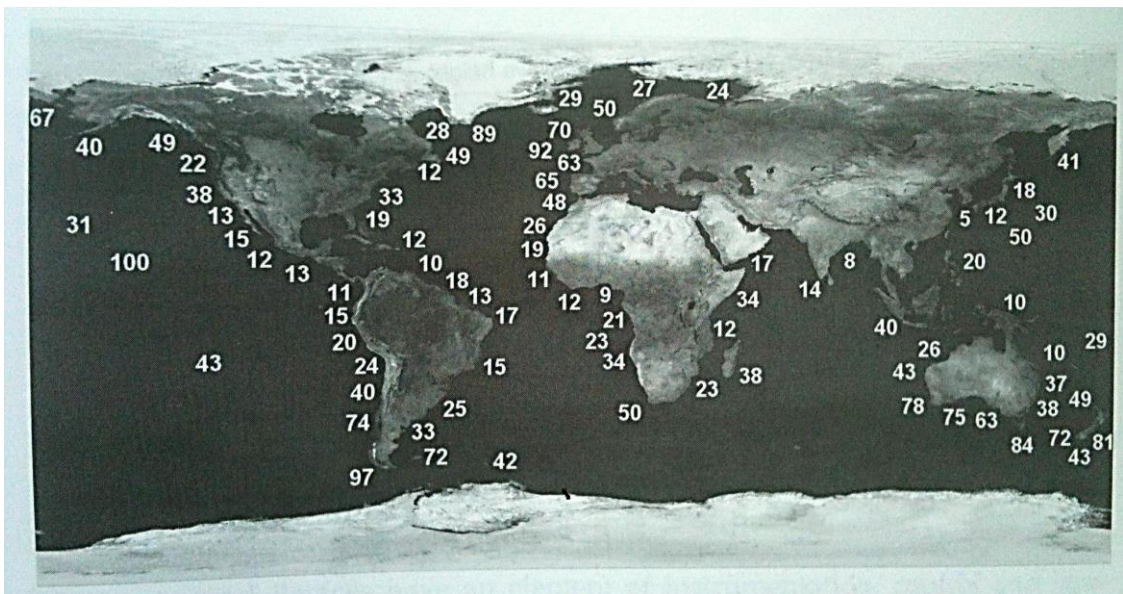
$$\text{Teho per metri} = H^2 T k W \cdot m^{-1}, \quad (1)$$

jossa H on aallon korkeus, T on aallon jakson aika ja m on aallon leveys. Tämä yhtälö pätee vain tasaisen vaimenemattoman aallon tapauksessa. Meriolosuhteissa jokaisella aallolla on erilainen aallonkorkeus ja jaksonaika, jolloin merenkäynnin arvioimiseksi ja aallokon tarjoaman tehon laskemiseksi tulee käyttää joitain erikoisarvoja. Tällaisia erikoisarvoja ovat merkitsevä aallonkorkeus (H_s) ja energiajaksonaika (T_e). Merkitsevällä aallonkorkeudella tarkoitetaan epäsäännöllisen aallokon aaltojen korkeimman kolmanneksen keskiarvoa. Energiajaksonaika kuvaa merkitsevän aallonkorkeuden omaavan aallon jaksonaikaa samaan tapaan kuin tasaisen vaimenemattoman aallon tapauksessa. Epäsäännöllisen aallokon sisältämä teho metriä kohden saadaan kaavasta (2). (Raymond & Lewis 2008, 130-131.)

$$\text{Teho per metri (epäsäännöllinen aallokko)} = 0,49H_s^2T_e kW \cdot m^{-1} \quad (2)$$

2.3 Aaltoenergian määrä maapallolla

Aaltoihin sitoutunutta energian määrää eri puolella maapallon meriä on kartoitettu käytämällä tähän tarkoitukseen suunniteltuja poijuja, jotka mittaavat aalto-olosuhteita ympäri maailmaa ja lähettävät keräämäänsä tietoa langattomasti sääpalveluyrityksille. Kuvio 2 esittää aaltoenergian tarjoaman tehon määrän jakautumista maapallolle vuosittaisena keskiarvona. Arvot ovat muotoa kilowatti metriä kohden. (Raymond & Lewis 2008, 133-135.)



KUVIO 2. Aaltoenergian määrä ympäri maapalloa (Raymond & Lewis 2008, 135)

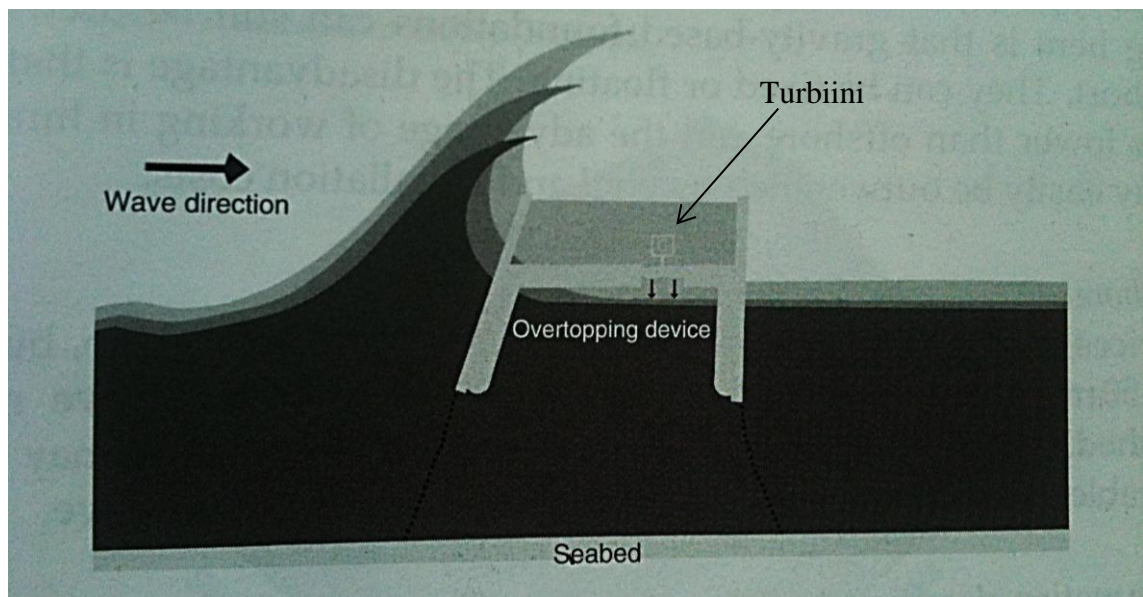
Kaiken kaikkiaan aaltojen tuottamat energiavarat (noin 2 TW) ovat suurin piirtein samaa luokkaa koko maapallon sähkönkulutuksen kanssa. Varovaisten arvioiden mukaan aaltovoimaa hyväksi käyttäen voitaisiin valjastaa käytettäväksi 10-25 % tästä kokonaisenergian määrästä, mutta se edellyttäisi aaltovoimatekniikan huomattavaa kehitystä. (Cruz 2008, 1.)

2.4 Aaltoenergian keräämismenetelmät

Aaltoenergian keräämiseen käytettäviä menetelmiä on monia erilaisia, mutta yleisimmät niistä voidaan pääpiirteittäin jakaa karkeasti kolmeen eri tapaan:

1. Potentiaalienergiaa hyödyntävät menetelmät (*Overtopping devices*)

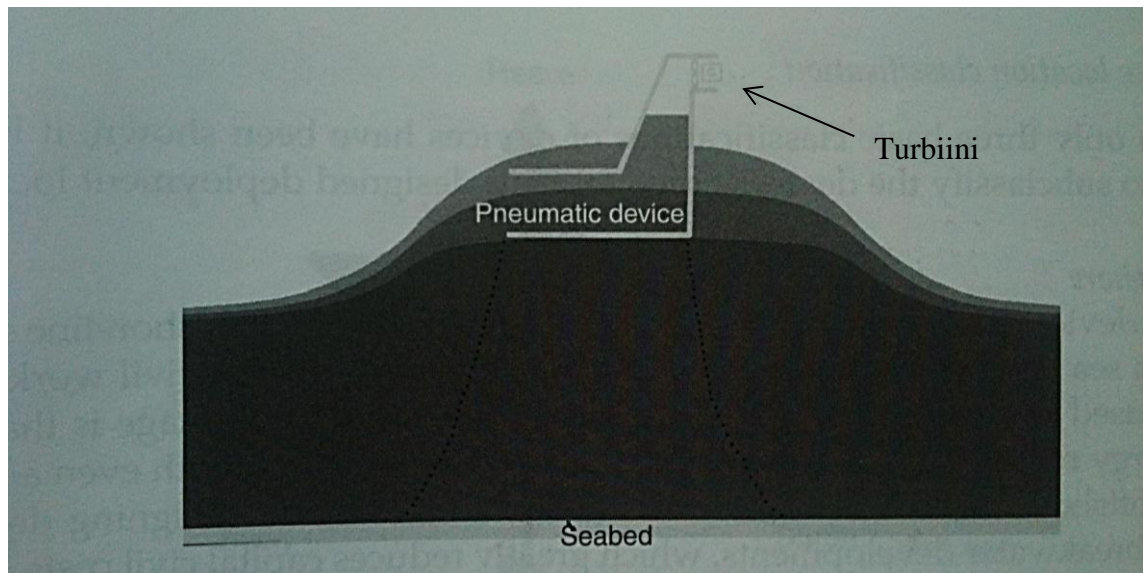
Tällaiset aaltovoimalat johtavat aallon erilliseen säiliöön, joka on korkeammalla kuin veden pinnan taso. Säiliöstä vesi ohjataan säiliön pohjalla olevan vesiturbiini läpi, joka pyöriessään tuottaa sähköä (kuvio 3). (Raymond & Lewis 2008, 139.)



KUVIO 3. Potentiaalienergiaa hyödyntävän menetelmän havaintokuva (Raymond & Lewis 2008, 139, muokattu)

2. Epäsuorasti pneumatiikkaa hyödyntävät menetelmät (*Indirect pneumatic devices*)

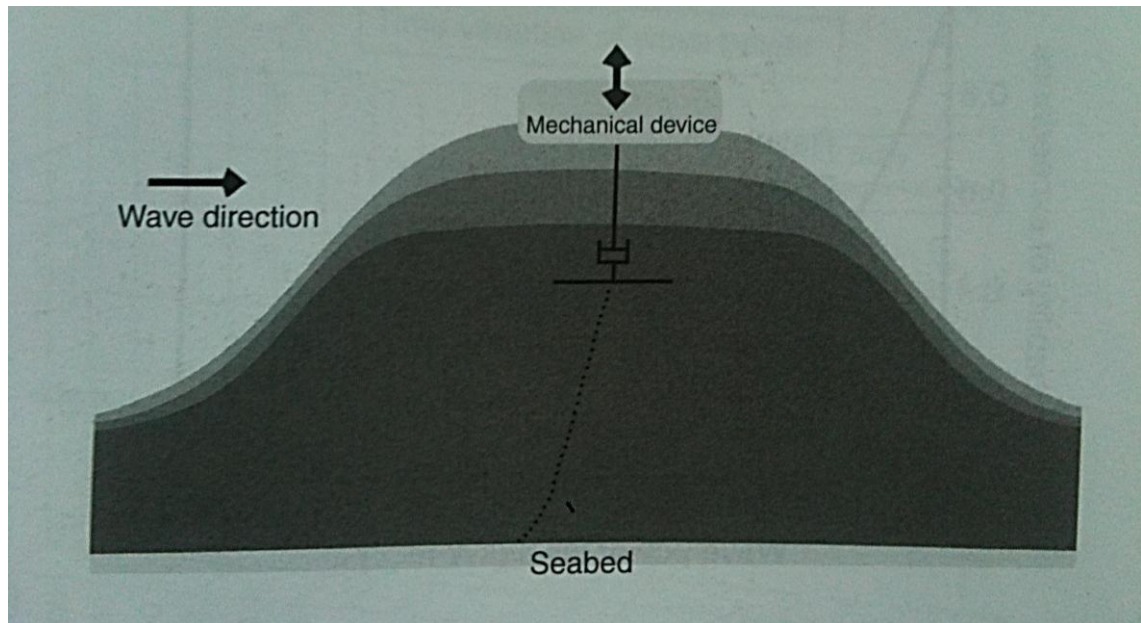
Tätä menetelmää käyttävät laitteet koostuvat kammioista, jonne vesi pääsee kulkeutumaan, sekä ilmaturbiinista joka on veden pinnan yläpuolella. Kun aalto kohtaa laitteen, nousee vedenpinta kammiossa joka saa aikaan ilman poistumisen kammioista turbiinin läpi, joka pyöriessään tuottaa sähköä. Kun aalto on kulkeutunut laitteen läpi, niin vedenpinta kammiossa laskee, joka aiheuttaa ilman imeytymisen kammioon, joka jälleen pyörittää turbiinia (kuvio 4). Tällaista menetelmää käyttävät laitteet tunnetaan yleisesti OWC-laitteina (*Oscillating water column device*).



KUVIO 4. Epäsuorasti pneumatiikkaa hyödyntävän laitteen havaintokuva (Raymond & Lewis 2008, 139, muokattu)

3. Aaltoa mekaanisesti hyödyntävät menetelmät

Tämä menetelmä kattaa alleen monia erilaisia sovelluksia, kuten aallon liikettä mukailtavat poijut (kuvio 5) ja tavallisesti rantaviivan läheisyydessä toimivat meren pohjaaaltoja hyödyntävät paneelien liikkeeseen perustuvat laitteet. Poijua käyttävien sovelluksien energian keräämistavat perustuvat pääsääntöisesti hydrauliseen järjestelmään tai lineaariseen generaattoriin. Paneelien liikkeeseen perustuvat sovellukset, ottavat aallon energian talteen muuntamalla aallosta aiheutuvan paneelin liikkeen generaattoriin yhdistetyn paneelissa kiinni olevan hydraulimoottorin pyörittämiseksi. (Raymond & Lewis 2008, 138.)

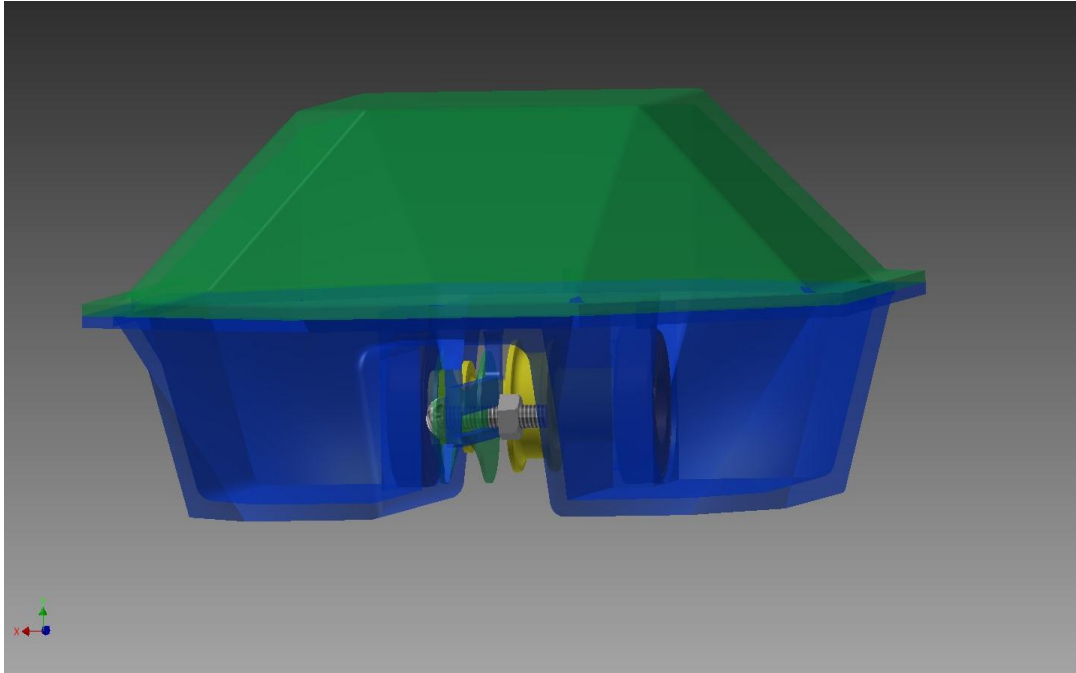


KUVIO 5. Aaltoa mekaanisesti hyödyntävän menetelmän havaintokuva (Raymond & Lewis 2008, 138)

2.5 TAMK:in aaltoenergiakeräin

Tampereen ammattikorkeakoululla (TAMK) on käynnissä aaltoenergiahanke, jonka tarkoituksena on valmistaa markkinakelpoinen aaltoenergiakeräin. Hanketta varten on tehty monia opinnäytetöitä ja erilaisia prototyyppisiä erilaisilla energian keräysmenetelmillä on saatu aikaan, mutta mikään sovelluksista ei ole lopulta osoittanut täysin toimivaksi.

Viimeisin kehitteillä oleva aaltoenergiakeräimen konsepti (kuvio 6) perustuu metallirakenteiseen kellukkaan, jonka sisällä on generaattori, tasasuuntausvaihteisto sekä elektroninen ohjausjärjestelmä.



KUVIO 6. TAMK:in aaltoenergiälaitteen konseptia havainnollistava CAD-mallinnos (Konsta Kilponen, 2015)

Kellukassa oleva akseli on kiinnitetty vaijerilla meren pohjassa sijaitsevaan ankkuriin akselilla olevan juoksupyörän kautta. Kun kellukka kelluu veden pinnalla, ja nousee aallon mukana aallon harjalle, niin juoksupyörän ympärille kelautunut vaijeri pyörittää akselia. Akseli on kiinnitetty tasasuuntausvaihteistoon, joka edelleen välittää akselin pyörimisliikkeen generaattorille. Pyöriessään generaattori tuottaa sähköä, joka johdetaan kellukasta ankkurin kautta rantaan. Kun kellukka laskeutuu aallonharjalta takaisin, niin erillinen vastapaino, jolla on oma juoksupyörä akselilla, kelaan ankkurille menevän vaijerin takaisin juoksupyörän ympärille. Tasasuuntausvaihteisto mahdollistaa myös tämän laskeutumisliikkeestä aiheutuvan akselin pyörimisliikkeen välittämisen generaattorille ja täten sähkön tuotannon. Vastapainon vaijeri on johdettu akselille kellukan takapäässä sijaitsevan juoksupyörän kautta, minkä tarkoitus on estää vaijerin sotkeutuminen ja parantaa kellukan suuntavakautta.

Kellukaprojekti on edennyt siihen pisteeseen, että kellukan prototyypin runko sekä vaihteisto on saatu valmistettua opiskelijoista kootun projektitiimin toimesta. Laitteistoon tuleva elektroninen ohjausjärjestelmä on vielä rakennusvaiheessa. Projektin seuraava vaihe on laitteiston toiminnan testaaminen.

3 PIKAMALLINNUS

3.1 Käsitteen määrittely

Pikamallinnuksella (*Rapid prototyping*) tarkoitetaan eri toimialoilla jonkin osan tai systeemin luomista ”pikaisesti” ennen lopullista julkaisua tai kaupallistamista. Toisin sanoen valmistetaan jotakin nopeasti siten, että tuloksena syntyy prototyyppi tai malli, josta jatkojalostamalla saadaan aikaan lopputuote. Tuotekehitysmielessä pikamallinnus termiä on käytetty kuvaamaan teknologioita, jotka valmistavat fyysisen prototyypin suoraan digitaalisen tiedoston (datan) perusteella. (Gibson, Rosen & Stucker 2010, 1.)

Liikkeenjohdon konsultit ja ohjelmistoinsinöörit käyttävät termiä kuvaamaan liiketoiminnan ja ohjelmistoratkaisujen paloittaista kehittämistä, joka mahdollistaa sen, että asiakkaat voivat testata tuotetta ja antaa palautetta jo kehitysprosessin aikana. (Gibson ym. 2010, 1.)

Pikamallinnus käsitteenä on vielä suhteellisen uusi, joten sen terminologia ei ole vielä täysin vakiintunut. Pikamallinnus-termin sijaan voidaan käyttää myös termiä ainetta lisäävä valmistusmenetelmä. (Gibson ym. 2010, 1.)

Ainetta lisäävän valmistusmenetelmän (*Additive Manufacturing*, AM) pääperiaate on, että malli voidaan luoda suoraan 3D-CAD-tiedostosta ilman tarvetta valmistuksen erilliselle suunnittelulle. Tällä menetelmällä on mahdollista valmistaa helposti mutkikkaitakin kappaleita. Siinä missä muut valmistusmenetelmät vaativat tarkkaa suunnittelua vaikeiden kappaleiden valmistuksessa, kuten millaisia työkaluja ja menetelmiä valmistuksessa tulisi käyttää, AM-teknologialla kappaleen valmistus tarvitsee vain tärkeimmät mittatiedot ja perusymmärryksen laitteen toiminnasta ja sen käyttämistä materiaaleista. (Gibson ym. 2010, 1-2.)

Ainetta lisäävässä valmistuksessa kappale saadaan aikaan lisäämällä materiaalia kerroksittain edellisen päälle. Jokainen kerros on ohut poikkileikkauksen siivu CAD-tiedostosta johdetusta kappaleesta. Koska jokaisella kerroksella on oltava jonkinlainen paksuus, valmistunut kappale on likiarvo alkuperäisestä CAD-mallista: mitä ohuempi

jokainen kerros on, sitä paremmin valmistettu kappale vastaa alkuperäistä CAD-mallia. (Gibson ym. 2010, 2.)

Kaikki tämänhetkiset kaupalliset pikamallinnuslaitteet käyttävät kerroksittaista aineen lisäys menetelmää. Laitteet eroavat toisistaan lähinnä käytettävän materiaalin, kerrosten muodostamistavan ja kerrosten toisiinsa kiinnittämistavan välillä. Edellä mainitut eroavaisuudet määrittävät muodostetun kappaleen vastaavuuden alkuperäismalliin, materiaali ja mekaaniset ominaisuudet, sekä kuinka nopeasti kappale voidaan valmistaa, kuinka paljon jälkityöstöä kappale vaatii valmistuksen jälkeen, AM-laitteen koon ja kuinka paljon kustannuksia laitteesta ja valmistusprosessista syntyy. (Gibson ym. 2010, 2.)

Alun perin pikamallinnusta käytettiin erityisesti visuaalisten mallien valmistamista varten tuotekehityksen avuksi, mikä on luonnollista, sillä yleisen tiedon mukaan fyysiset mallit ovat tehokkaampia kuin piirustukset, kun suunnittelijan ideoita esitellään konseptitasolla. Vaikka piirustukset ovatkin nopeampia ja helpompia tehdä, niin melkein aina tarvitaan kuitenkin fyysinen malli, jotta suunnitelma voitaisiin täysin vahvistaa. (Gibson ym. 2010, 3.)

Pikamallinnusteknologian kehittyessä käytettävien materiaalien, mallien oikeanlaisuuden ja yleisesti ottaen tuotosten laadunparantamisen myötä malleja voitiin alkaa hyödyntämään myös suunnitellun mallin muodon, sopivuuden ja toiminnan tarkastelussa. Suunnitellun mallin muotoilua ja yleistä tarkoituksenmukaisuutta voitiin arvioida, laitteiden tarkkuuden kehittyessä kappaleiden pikamallinnus oikeanlaisissa toleransseissa mahdollistui, minkä avulla voitiin arvioida tuotteen kokoonpanon ja asennuksen asettamia vaatimuksia, ja materiaaliominaisuuksien kehittymisen myötä kappaleita voitiin käsitellä samalla tavalla kuin lopputuotettakin, mikä auttoi arvioimaan tuotteen lopullista toimintakykyä. (Gibson ym. 2010, 3.)

Muiden teknologioiden ja valmistusmenetelmien rinnalla käytettynä AM-teknologia voi huomattavasti auttaa nopeuttamaan ja vähentämään kustannuksia tuotekehityksessä. Koska AM-laitteiden teknisten ominaisuuksien kehittyminen on mahdollistanut pikamallintamalla valmistettujen tuotteiden käyttämisen sellaisenaan lopputuotteena, on ymmärrettävää että pikamallinnus-termistä on siirrytty käyttämään valmistusmenetelmää enemmän kuvaavaa *ainetta lisäävä valmistusta* sen sijasta. (Gibson ym. 2010, 3.)

Tässä työssä käytetään pikamallinnus- ja AM-termejä paikoitellen vuorottain, mutta niillä tarkoitetaan samaa asiaa.

3.2 Pikamallinnusprosessin peruskuvio

Useimmat AM-prosessit noudattavat kahdeksan askeleen rakennetta CAD-mallin luomisesta valmiiseen kappaleeseen (Gibson ym. 2010, 41). Nämä askeleet ovat:

1. CAD-tiedoston valmistaminen
2. STL-tiedostoksi muuntaminen
3. Tiedoston siirtäminen pikamallinnuslaitteelle
4. Laitteen asetusten valikoiminen
5. Kappaleen luominen
6. Kappaleen irrottaminen laitteesta (ja puhdistaminen)
7. Jälkikäsittely
8. Valmiin kappaleen soveltaminen käyttöön

3.2.1 CAD-tiedoston valmistaminen

Jokainen ainetta lisäävällä menetelmällä valmistetun kappaleen valmistaminen alkaa tietokonemallista, jonka tulee käsittää kappaleen koko ulkoinen geometria. Mallintamiseen voidaan käyttää lähes mitä tahansa CAD-ohjelmaa, mutta tuotoksen tulee olla joko 3D- tai pintamalli. Käänteisen suunnittelun (Reverse Engineering) avulla mallinnus voidaan tehdä myös olemassa olevasta fyysisestä kappaleesta esimerkiksi laser skannausta hyväksi käyttäen. (Gibson ym. 2010, 42.)

3.2.2 STL-tiedostoksi muuntaminen

Melkein jokainen AM-laite hyväksyy STL-tiedostomuodon, mikä on käytännössä muodostunut standardiksi ja pääsääntöisesti kaikki CAD-ohjelmistot pystyvät tällaisen tiedostomuodon tuottamaan. Tämä tiedostomuoto kuvantaa CAD-tiedostosta pelkän geometrian, jättäen ylimääräiset rakennetiedot ja mallinnus historian pois muodostamalla kappaleen pinnat kolmioina. (Gibson ym. 2010, 44.)

3.2.3 Tiedoston siirtäminen pikamallinnuslaitteelle

Kun STL-tiedosto on luotu, siirretään se AM-laitetta käyttävälle tietokoneelle. Joissain tapauksissa tulostamistyö voidaan aloittaa heti, mutta usein vaaditaan joidenkin tehtävien suorittaminen. Aluksi on tietenkin hyvä tarkistaa, että tulostettavaksi valittu kappale on oikea. Tätä varten AM-laitteiden ohjelmistoissa on usein työkalu, jolla kappaletta voidaan visuaalisesti tarkastella ja käsitellä. Tässä kohtaa voidaan määrittää asento, jossa kappale valmistetaan, sekä sijainti laitteen tulostusalustalta, mihin kappale valmistetaan. Jos samalla kertaa halutaan tulostaa monta kopiota samasta kappaleesta tai vaikkapa eri STL-tiedostoja, voidaan niiden sijainnit ja asennot määrittellä halutulla tavalla. Kappaleen koon skaalaus voidaan suorittaa tässä vaiheessa. Pikamallinnettavan kappaleen tulee olla joissain tapauksissa hieman isompi tai pienempi, kuin alkuperäinen malli, sillä kappale saattaa kutistua jäähtyessään tai vaatia päälle pinnoitekerroksen. Nämä kappaleen kokoon vaikuttavat huomioon otettavat asiat riippuvat käytettävästä pikamallinnusmenetelmästä ja materiaalista. Samankaltaisten kappaleiden erottamiseksi voidaan kappaleisiin lisätä kohokirjaimilla kirjoitettuja tunnisteita. Jos kappaleesta halutaan tietyn kokoinen pikamallinnos, joka ei mahdu tulostusalustalle, voidaan kappale tulostaa osissa, mikäli laitteen ohjelmisto siihen pystyy. Myös osakappaleiden yhdistäminen voidaan suorittaa tässä kohtaa joissain tapauksissa. (Gibson ym. 2010, 45.)

3.2.4 Laitteen asetusten valikoiminen

Jokaisessa AM-laitteessa on ainakin joitain asetuksia joiden arvoja voi muuttaa. Asetukset riippuvat hieman laitteesta ja käytettävästä AM-tekniikasta. Laitteet jotka käyttävät vain muutamaa eri materiaalia ja eivät sisällä kerrospaksuuden säätöominaisuuksia tai muita tulostusparametreja vaativat vain hyvin vähän asetusten säätöä ennen kuin tulostaminen voidaan aloittaa. Vastaavasti laitteet, jotka käyttävät monia eri materiaaleja ja sisältävät useita säädettävissä olevia asetuksia, kuten osan tulostusresoluution säätömahdollisuuden huonommaksi tulostamisen nopeuttamiseksi, voivat vaatia hieman enemmän asetusten säätämistä ennen kuin tulostaminen voidaan aloittaa. Tavallisesti onkin helpointa käyttää oletusasetuksia, jos ei tiedä kaikkien asetusten tarkoituksista. Aiemmin tallennettujen valmiiksi määriteltujen asetusten käyttäminen on myös hyvä keino nopeuttaa asetusten valintaa ja välttää virheitä. Vääränlaiset asetukset voivat vai-

kuttaa ei-toivotulla tavalla tulosteen laatuun, mikä voi johtaa siihen, ettei tulostetta voida käyttää. (Gibson ym. 2010, 45.)

3.2.5 Kappaleen valmistaminen

Edellä oleviin vaiheisiin verrattuna itse tulostamisosuus hoituu pitkälti täysin tietokoneohjatusti. Pääsääntöisesti kaikki AM-laitteet noudattavat samanlaista etenemistapaa kappaleen muodostamisessa: korkeussäätävälle tulostusalustalle lisätään ainetta poikkileikkaus kerrallaan, jonka jälkeen tulostusalusta liikkuu yhden kerrospaksuuden verran alaspäin ja uusi kerros ainetta lisätään edellisen poikkileikkauksen päälle. Tätä toistetaan niin pitkään kunnes kappale on valmis tai käytettävä raaka-ainemateriaali loppuu, minkä jälkeen laite hälyttää käyttäjää tekemään tarvittavat toimenpiteet. (Gibson ym. 2010, 46.)

3.2.6 Kappaleen irrottaminen laitteesta (ja puhdistaminen)

Ihannetapauksessa tulostettu tuotos olisi tässä kohtaa täysin valmis käytettäväksi, mutta näin ei useinkaan ole, vaan tarvitaan jonkin verran manuaalista käsittelyä halutunlaisen lopputuloksen saavuttamiseksi. Kaikissa tapauksissa kappale tulee irrottaa tulostusalustastaan, ja jos tulostuksessa on käytetty tukirakenteita tai erillistä tukimateriaalia, tulee ne poistaa kappaleen ympäriltä. Tukimateriaalia käytetään apuna tulostusprosessissa, jotta kappale ei romahtaisi tai vääntyisi. Tukimateriaalin poistaminen tapahtuu joko upottamalla kappale altaaseen, jossa on tukimateriaalia liuottavaa ainetta tai manuaalisesti työkaluilla materiaalia irrottamalla. (Gibson ym. 2010, 46.)

3.2.7 Jälkikäsittely

Jälkikäsittelyllä tarkoitetaan tässä yhteydessä kappaleen viimeistelyä ennen loppukäyttöön siirtämistään. Tämä vaihe voi sisältää pinnan hiomista, kiillottamista tai vaikkapa pinnoittamista. Jälkikäsittely riippuu pitkälti siitä millaiseen käyttöön kappale tulee. Joissain tapauksissa tarvitaan vain vähän jälkikäsittelyä, mikä vaikuttaa positiivisesti

kappaleen kokonaisvalmistamisaikaan. Jotkin käyttökohteet vaativat pikamallinnetulta kappaleelta erittäin tarkkaa mittatarkkuutta ja viimeistelyä, minkä johdosta jälkikäsitteily tulee tehdä erittäin huolellisesti ja se vie enemmän aikaa.

Eri AM-tekniikoilla saadaan aikaan erilaisia tuloksia mittatarkkuuksien ja materiaaliominaisuuksien osalta. Joillakin tekniikoilla valmistetuista kappaleista saattaa tulla verrattain hauraita, minkä vuoksi ne tarvitsevat erillisen pinnoitteen tai tunkeuma-aineen, jotta kappaleesta saadaan vahvempi. (Gibson ym. 2010, 46-47.)

3.2.8 Valmiin kappaleen soveltaminen käyttöön

Jos valmista AM-tekniikalla valmistettua kappaletta aiotaan käyttää muuhun, kuin visuaalisen tarkasteluun, tulee ottaa huomioon, että vaikka kappale olisikin valmistettu samasta materiaalista kuin vastaavat muilla valmistusmenetelmillä, kuten valamalla, valmistetut kappaleet, niin kappale ei välttämättä käyttäydy käytetyn materiaalin standardien mukaan. Tämä johtuu siitä, että jotkut AM-tekniikat luonnostaan jättävät valmistettavan kappaleen sisään onteloita tai kuplia, mikä voi aiheuttaa sen, ettei kappale kestäkään mekaanisen kuormituksen alla niin kuin pitäisi. Lisäksi joillain AM-tekniikoilla materiaali saattaa hajota jo kappaleen valmistusprosessin aikana tai materiaalit eivät sitoudu, yhdisty tai kristallisoidu (kiteydy) parhaalla mahdollisella tavalla. (Gibson ym. 2010, 47.)

AM-tekniikat ja käytettävät materiaalit kehittyvät kokoajan, mikä auttaa tulevaisuudessa valmistamaan yhä kestävämpiä rakenteita ja kappaleita. Toisaalta on olemassa lukemattomia kohteita, joissa voidaan käyttää AM-tekniikalla valmistettuja kappaleita, missä kappaleelta tai osalta ei vaadita niin tarkkoja mekaanisia ominaisuuksia. (Gibson ym. 2010, 47.)

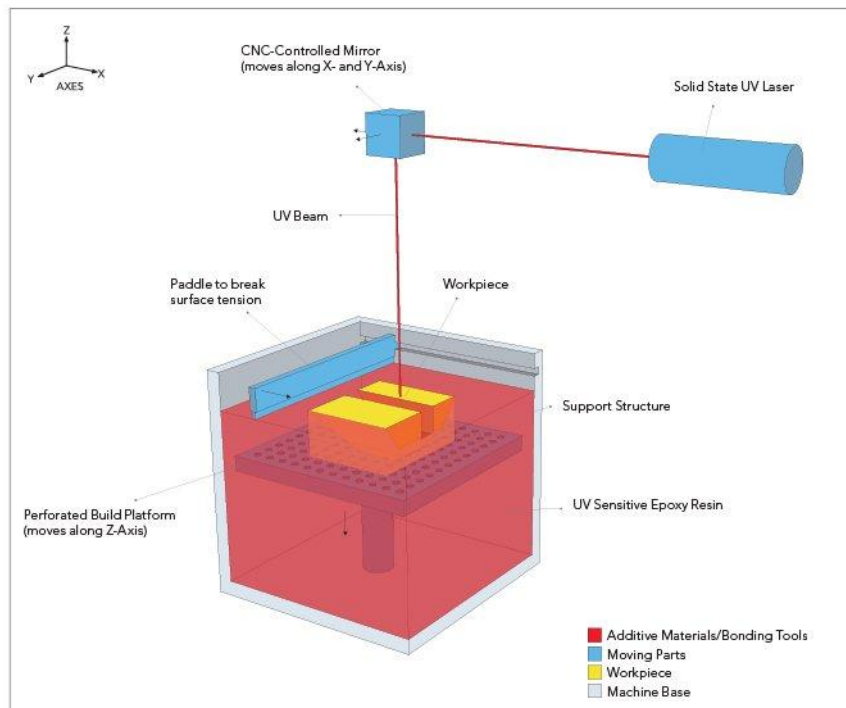
3.3 Pikamallinnustekniikat

Tällä hetkellä on olemassa monia eri pikamallinnustekniikoita, joiden avulla kappaleita voidaan valmistaa. Pääpiirteittäin menetelmät voidaan jakaa eri luokkiin sen mukaan, miten kappale raaka-aineesta muodostetaan. Tavallisimpia tapoja muodostaa kappale on jauhemaista aineesta sintraamalla, sulaa materiaalia suuttimesta pursottamalla,

laminoitavasta kalvosta leikkaamalla ja nestemäistä ainetta UV-valolla tai laserilla kovettamalla. Seuraavaksi käsitellään muutaman yleisimmän tekniikan toimintaperiaatteet.

3.3.1 Stereolitografia (SLA)

Stereolitografia oli ensimmäinen laajempaan käyttöön otettu pikamallinnusmenetelmä. Stereolitografiassa (kuvio 7) UV-laser kovettaa valokovetteista polymeeriä ohuina kerroksina. Kerrospaksuus vaihtelee 0.05 mm ja 0.15 mm välillä laitteesta ja siinä käytettävistä asetuksista riippuen. Kappale muodostetaan vaakatasossa olevalle rei'itetylle alustalle, joka on upotettuna nestemäistä polymeeriä sisältävään altaaseen. Alkutilanteessa alusta on juuri nestepinnan yläpuolella, jonka jälkeen alusta laskeutuu yhden kerrospaksuuden verran alaspäin nestealtaaseen. Nyt UV-laser kovettaa ensimmäisen kerroksen polymeeriä, jonka jälkeen alusta laskeutuu jälleen yhden kerrospaksuuden verran alaspäin, jolloin laitteen pyyhkäisijä voi siveltää tasaisen ja oikean paksuisen kerroksen ei kovettunutta polymeeriä edellisen kovetetun kerroksen päälle. Kun tämä kerros kovetetaan UV-laserilla, se tarttuu tiukasti kiinni edelliseen kerrokseen. Näin jatketaan kerros kerrokselta kunnes kappale on valmis, minkä jälkeen kappale siirretään pesuriin, jossa puhdistetaan ylimääräiset nestemäiset polymeerit pois kappaleesta. (Bryden 2014.)



KUVIO 7. Stereolitografiaprosessin havaintokuva (Bryden 2014)

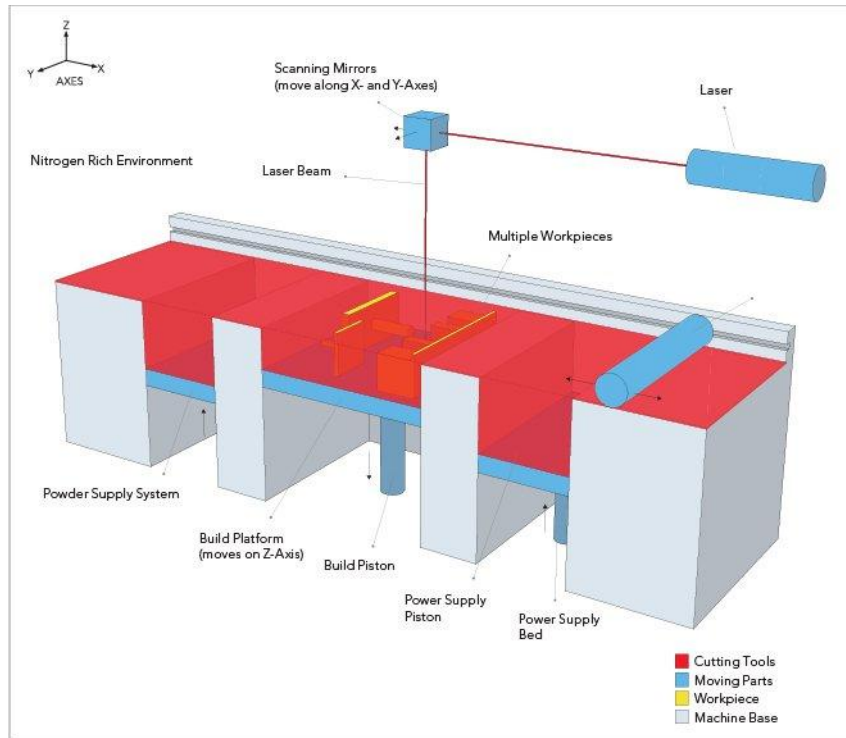
Jos kappaleen valmistaminen on vaatinut tukirakenteiden muodostamista, ne tulee irrottaa manuaalisesti, ennen kuin kappale siirretään UV-uuniin jälkikovettumaan. UV-uunin jälkeen kappale on täysin polymerisoitunut. (Bryden 2014.)

Stereolitografia-menetelmän etuna on hyvä mittatarkkuus toleranssien ollessa jopa 0,05 mm luokkaa sekä hyvä pinnan laatu. Monien eri valokovetteisten epoksien ja akryyliä käyttömahdollisuuden vuoksi menetelmällä voidaan saavuttaa halutunlaisia materiaaliominaisuuksia. Tämä yhdessä menetelmän tarkkuuden kanssa on johtanut siihen, että SLA-menetelmällä valmistettuja prototyyppisiä käytetään yleisesti toiminnallisten ominaisuuksien tarkastelussa. Myös läpinäkyviä ja joustavia kappaleita voidaan valmistaa. (Bryden 2014.)

Huonoina puolina menetelmällä on tukirakenteiden tarve riippuvien osien tulostamisessa, mikä voi vaikeuttaa erittäin mutkikkaiden muotojen toteuttamista. Muihin AM-tekniikoihin verrattuna SLA-menetelmällä valmistettujen osien vahvuus ja iskunkestävyys ovat heikommat. Vaikka valmistusaika onkin tällä menetelmällä suhteellisen nopea, niin UV-uunissa jälkikovettamisen vaatima aika voi tehdä menetelmästä hitaamman kuin muista AM-tekniikoista. Jos mallinnetun kappaleen sisällä on suljettuja rakenteita, niin nestemäinen polymeeri jää valmistusvaiheessa rakenteen sisään. Tämän voi välttää lisäämällä CAD-malliin pienen tyhjennysaukon sopivaan kohtaan. (Bryden 2014.)

3.3.2 Selective laser sintering (SLS)

Selective laser sintering- eli valikoivassa lasersintrausmenetelmässä (kuvio 8) laser sulattaa hienojakoista lämpömuovautuvaa muovijauhetta kappaleen kerrosten muodon mukaisesti. Prosessi on samankaltainen, kuin stereolitografiassa, mutta polymeerit ovat nestemäisen sijaan jauhemaisessa muodossa, ja raaka-aineena käytettävä jauhe on erillisessä altaassa kuin valmistettava kappale. Kun laseri on sulattanut yhden kerroksen muovipulveria, tulostusalusta laskeutuu yhden kerrospaksuuden verran alaspäin, jonka jälkeen erillinen rulla levittää uuden kerroksen jauhetta edellisen kerroksen päälle. Tätä toistetaan niin pitkään kunnes kappale on valmis. Ennen kappaleen muodostamisen aloittamista jauhe lämmitetään hieman sen sulamispistettä alhaisempaan lämpötilaan, jolloin laserin on helpompi sulattaa sitä. (Bryden 2014.)



KUVIO 8. SLS-menetelmän havaintokuva (Bryden 2014)

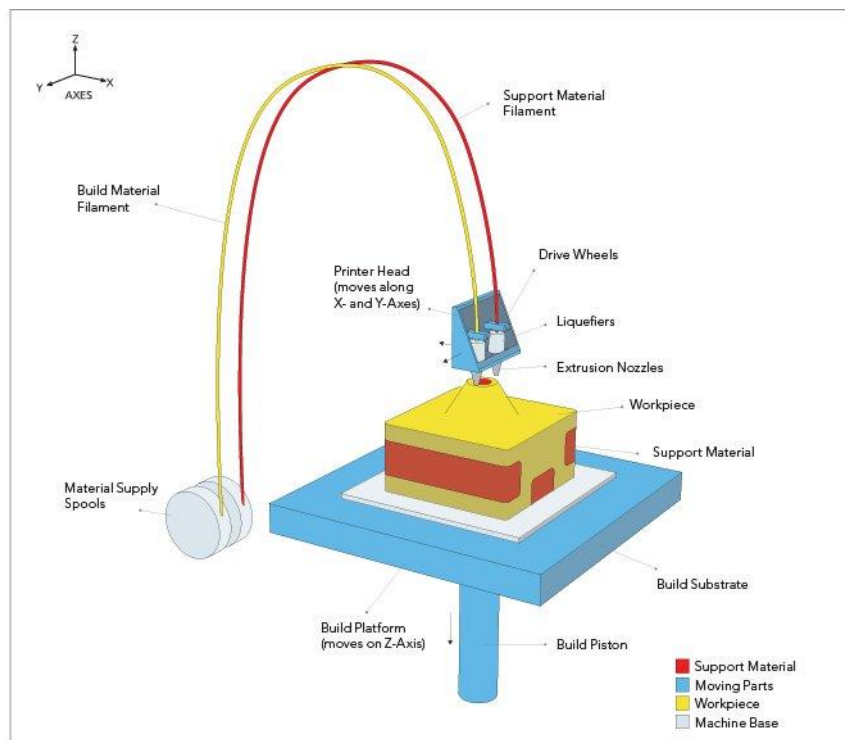
Valikoivan lasersintrausmenetelmän etuihin kuuluu siinä käytettävien materiaalien avulla saavutettavissa olevat kappaleen hyvät mekaaniset ominaisuudet. Usein raaka-aineena käytetyn nailonjauheen sekaan voidaan lisätä esimerkiksi lasikuitua tai alumiinia, jolloin voidaan saavuttaa hyvinkin erilaisia ominaisuuksia, kuten lämmönkestävyyttä tai taivutusominaisuuksien paranemista. Menetelmän eduksi voidaan lukea myös se, ettei erillistä tukirakenteiden muodostamista tarvita, sillä muodostuneen kappaleen ympärillä oleva jauhemaisessa olomuodossa oleva materiaali toimii itsessään tukirakenteena. Tämän ominaisuuden vuoksi voidaan valmistaa myös hyvin mutkikkaita rakenteita. (Bryden 2014.)

Huonoja puolia SLS-menetelmällä on sen pinnan viimeistelyn taso jää alhaiseksi verrattuna SLA-menetelmällä valmistettuihin kappaleisiin. Menetelmästä johtuen kappaleeseen muodostunut pinta jää huokoiseksi, mikä voi vaatia loppukäyttökohteesta riippuen erillisen käsittelyn, kuten lakkaamisen, pinnan suojaamiseksi. Samalla tavalla kuin SLA-menetelmällä, suljettuja rakenteita varten tulee CAD-malliin lisätä tyhjennysaukko sisään jääneen pulverin pois saamiseksi. (Bryden 2014.)

3.3.3 Fused deposition modeling (FDM)

Fused deposition modeling on Stratasys Inc-yhtiön omistama tavaramerkki, mutta vastaavaa tekniikkaa käytetään muidenkin valmistajien laitteissa, jolloin menetelmää kutsutaan *Fused filament fabrication* (FFF) nimellä.

FDM-menetelmän toimintaperiaate (kuvio 9) perustuu lämpömuovautuvan polymeerin kuumentamiseen yli sen sulamispisteen ja pursottamiseen kapeasta suuttimesta ohuena nauhana työtasolle kerroksittain. Sulaa raaka-ainemateriaalia syötetään jokaisen kerroksen poikkileikkauksen mukaisiin kohtiin. Jokaisen kerroksen jälkeen työtaso laskeutuu käytetyn kerrospaksuuden verran alaspäin ja uusi kerros materiaalia syötetään edellisen kerroksen päälle. Tätä jatketaan niin pitkään, että kappale on valmistunut. Tukimateriaalia syötetään roikkuvien kappaleenosien alle sitä mukaa kun kappale valmistuu. Kappaleen valmistuttua siinä käytetyt tukimateriaalit irrotetaan joko manuaalisesti murtamalla tai kappale siirretään altaaseen, jossa oleva neste sulattaa tukimateriaalin pois. (Bryden 2014.)



KUVIO 9. FDM-menetelmän havaintokuva (Bryden 2014)

Tällä menetelmällä ei synny lainkaan ylimääräistä nestettä tai pulveria, joten FDM-laitteet soveltuvat hyvin myös toimistokäyttöön. FDM-menetelmällä voidaan valmistaa isoja, lujia ja kestäviä kappaleita, joita voidaan käyttää niin konseptimalleina kuin myös toiminnallista testausta vaativina prototyyppeinä. Käytettävissä olevat polymeerimateriaalit ovat suurin piirtein samoja kuin muissakin muovin valmistus prosesseissa käytetyt, joilla on hyvät iskunkestävyys-, vetolujuus-, naarmutuksenkestävyys- ja kemikaalienkestävyysominaisuudet. Menetelmällä valmistettuja kappaleita voidaan käyttää myös esimerkiksi valumalleina. (Bryden 2014.)

Huonoina puolina voidaan pitää sitä, että suuttimen koko, josta raaka-ainemateriaali pursotetaan alustalle, määrittää tulosteen tarkkuuden ja viimeistelyn laadun. SLA-menetelmään verrattuna kerrospaksuudet jäävät myös verrattain isoiksi, niiden ollessa luokkaa 0.13-0.33 mm, laitteesta riippuen. Tulostusprosessi ei ole myöskään erityisen nopea. (Bryden 2014.)

4 PIKAMALLINNUS OSANA TUOTEKEHITYSTÄ

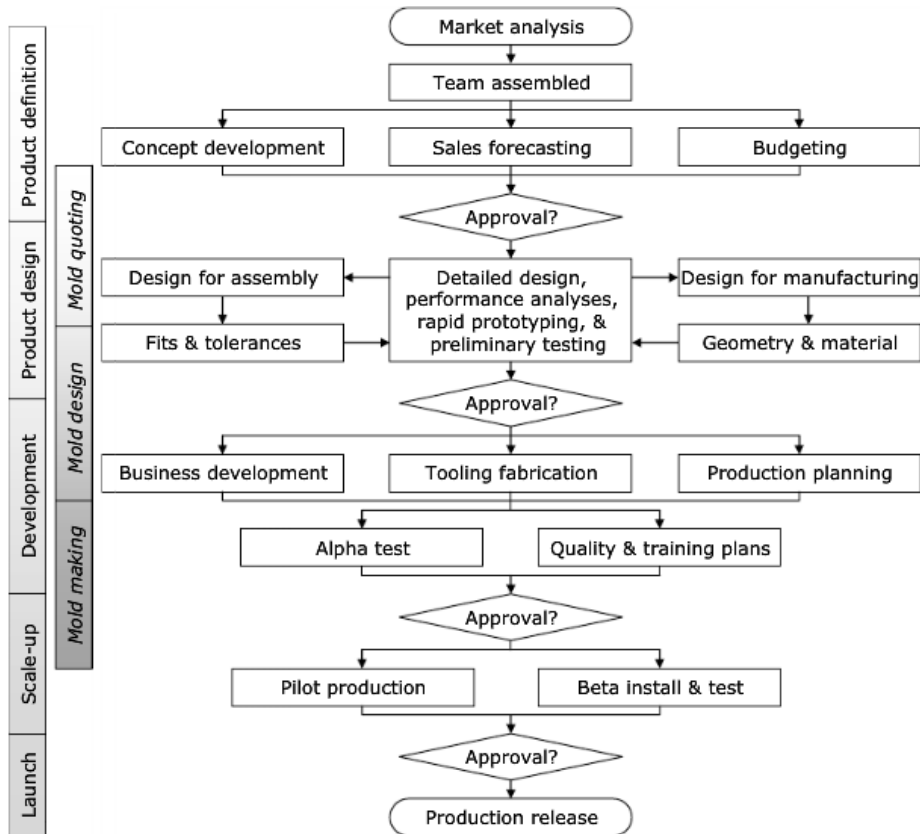
Kuten kappaleessa 3 todettiin, pikamallinnusta on perinteikkäästi käytetty tuotekehityksessä lähinnä prototyypin ja visuaalisten mallien valmistamiseen, mutta AM-tekniologioiden kehittymisen myötä pikamallintamalla voidaan valmistaa täysin loppukäyttöön kelpaavia kappaleita. Pikamallintamisen oikeanlaisella soveltamisella tuotekehityksen eri vaiheissa voidaan optimoida koko tuotekehitysprosessia.

4.1 Tuotekehitys-käsitteen määrittäminen

Onnistuneella tuotekehityksellä tarkoitetaan jonkin tuotteen kehittämistä siten, että uusi tuote on mahdollisimman laadukas, sen kehittämiseen on kulunut mahdollisimman vähän aikaa ja rahaa, ja että tuote on valmistettavissa nopeasti, turvallisesti ja järkevään hintaan (Gebhardt 2003,1). Tuotekehitystyön läpiviemiseksi on monia erilaisia prosesseja, mutta useimpia niistä yhdistää kaksi oleellista tekijää:

- Tuotekehityssuunnitelma on jäsenneilty osiin, jotta voidaan varmistua suunnittelun ja valmistuksen seurannasta ja näiden vaiheiden valmistumisesta, sekä
- erillisten porttien käyttö prosessin vaiheiden välissä. Kustakin portista pääsee kulkemaan, kun saavutetut tulokset on esitelty ja arvioitu. Näin varmistutaan siitä, ettei projektia lähdetä viemään liian aikaisin pidemmälle ja tuhlataisi projektille varattua budjettia huonojen ratkaisujen kehittämiseksi. (Kazmer 2007, 18.)

Kuviossa 10 on esitelty yksi esimerkki tuotekehitysprosessin etenemisjärjestyksestä, jossa on käytetty portteja eri vaiheiden välillä. Uudenlaisen tuotteen tuotekehitys alkaa markkinaselvityksellä ja kehitettävän tuotteen ideoinnilla sekä määrittelyllä, josta siirrytään tuotteen suunnittelun, tuotteen testauksen ja tuotteen valmistuksen suunnittelun kautta pilottierän valmistukseen ja lopulta tuotteen julkaisemiseen markkinoille.



KUVIO 10 Tuotekehitysprosessin etenemiskaavio (Kazmer 2007, 17)

4.2 Tuotekehityksen uudenlaiset haasteet

Alati muuttuvat kuluttajien ja ympäristön vaatimukset ja toiveet tuotteille ovat johtaneet siihen, että myös tuotekehitysprosessien tulee kyetä vastaamaan näihin vaatimuksiin mahdollisimman hyvin. Tuotekehityksen tuleekin kyetä vastaamaan muun muassa seuraaviin uudenlaisiin haasteisiin:

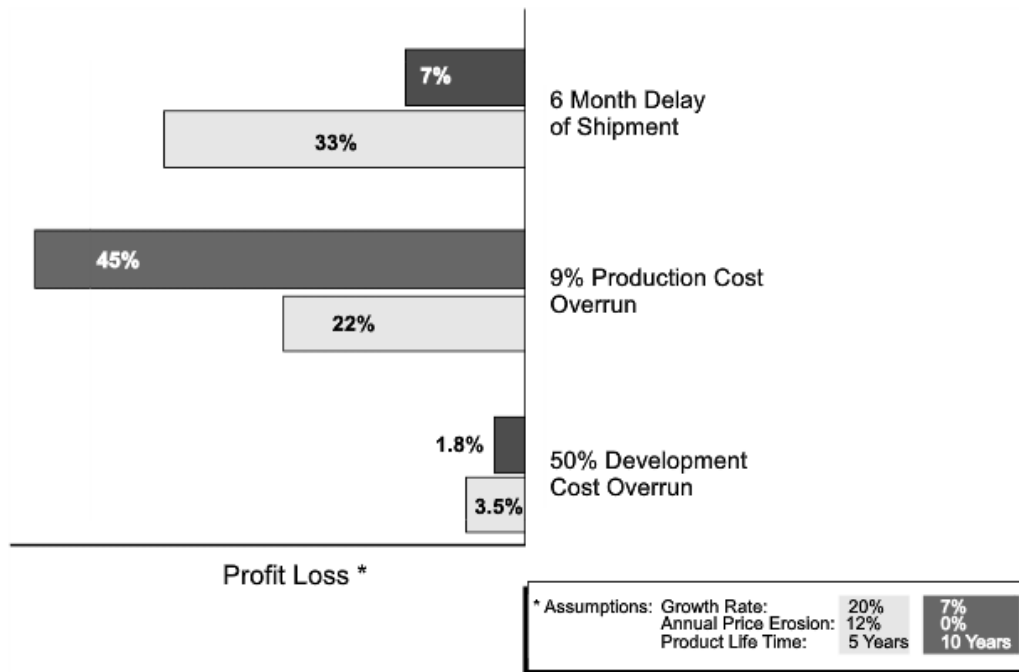
- Epätavalliset ja nopeasti muuttuvat kuluttajien toiveet (On yhä vaikeampaa tietää mitä kuluttajat haluavat ja myös muun muassa trendit vaikuttavat ostokäyttäytymiseen),
- Muotoilun kasvava merkitys,
- Tuotteiden räätälöinti kuluttajan toiveiden mukaan,
- Ympäristön asettamat vaatimukset (kuten tuotteiden ja niiden pakkausten kierrätys),
- Tuotteiden eliniän lyheneminen,

- Laskevat hinnat (johtuen maailmanlaajuisista markkinoista sekä nopeasta tiedonkulusta maanosien välillä), sekä
- Säännökset ja standardit (esimerkiksi kun tuotteita viedään eri valtioihin). (Gebhardt 2003,1-2.)

Tuotekehitys onnistuu selviämään edellä luetelluista haasteista seuraavin keinoin:

- Tuotekehitykseen kuluvan ajan lyhentäminen,
- Kustannusten vähentäminen,
- Joustavuuden lisääminen niin tuotteiden kuin tuotannonkin osalta, sekä
- Laadun parantaminen. (Gebhardt 2003,5.)

Tuotekehitysprosessin onnistumisen kannalta tärkeimpänä tekijänä voidaan pitää tuotekehitykseen kuluvan ajan ja kustannuksien yhdistettävää käsitettä *Time to market*, millä tarkoitetaan sitä aikaa mikä kuluu tuotekehitysprosessin aloittamisesta tuotteen markkinoille saattamiseen. Tutkimusten mukaan rahan säästyminen on suurimmillaan silloin, kun tuo kulunut aika on mahdollisimman lyhyt. Trendinä olevan tuotteiden elinkaaren lyheneminen tekee *Time to market* -ajan lyhentämisestä vieläkin tärkeämmän koskien liki kaikkia tuotteita. Kuviossa 11 on esitelty eri tekijöiden vaikutusta voittoihin tuotekehitysprosessin aikana. (Gebhardt 2003,6.)

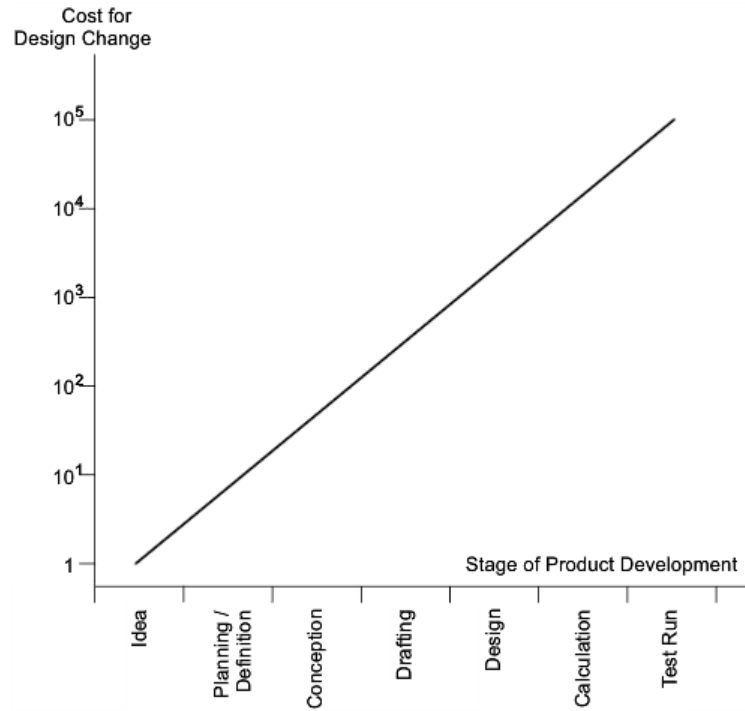


KUVIO 11. Eri tekijöiden vaikutuksia voittoihin (Gebhardt 2003,7)

Vaalean harmaa väri kuviossa esittää tuotetta, jonka elinikä on 5 vuotta, ja tumman harmaa väri esittää tuotetta, jonka elinikä on 10 vuotta.

Kuvion mukaan 50 % ylitys tuotekehitykseen varatusta budjetista aiheuttaa lopulta vain 3,5 % häviöt odotettuihin voittoihin, kun taas tuotantokustannuksiin budjetoitujen rahojen ylittyminen 9 % johtaa jopa 22 % alenemaan voitoissa. Toisaalta, jos suunniteltu tuotekehitykseen kuluva aika ylittyy kuudella kuukaudella, mikä aiheuttaa markkinoille pääsyn myöhästymisen, aiheutuu siitä jo 33 % häviöt voittoihin. (Gebhardt 2003,6-7.)

Tuotekehitysprosessissa on tärkeää huomata, että mitä myöhemässä vaiheessa prosessia jokin muutos joudutaan tekemään suunniteltuun tuotteeseen, sitä kalliimmaksi tuon muutoksen tekeminen tulee. Kuvio 12 esittää tuotekehityksen vaiheen suhdetta muutoksen teosta aiheutuviin kustannuksiin. (Gebhardt 2003,9.)



KUVIO 12. Tuotekehityksen vaiheen suhde muutoksesta aiheutuviin kustannuksiin (Gebhardt 2003, 9)

Kuvaajan mukaan kustannukset nousevat eksponentiaalisesti sitä mukaa mitä pidemmällä tuotekehitysprosessissa ollaan, kun muutosta tuotteeseen aletaan tekemään. Esimerkkinä tästä voidaan pitää jo markkinoilla olevan ajoneuvon takaisinvedosta syntyviä kustannuksia, vaikka takaisinvetoon johtaneen viallisen komponentin arvo saattaa olla suhteellisen pieni. (Gebhardt 2003, 9.)

4.3 Pikamallinnuksen tarjoamat edut tuotekehitysprosessiin

4.3.1 Mallien käyttämisellä saavutettavat edut

Pikamallinnusta voidaan käyttää hyväksi monessa eri kohtaa tuotekehitysprosessia esimerkiksi erilaisten mallien valmistamiseen (Gebhardt 2003, 15). Eri vaiheissa käytettävät mallit voidaan luokitella seuraavasti niiden käyttötarkoituksen mukaan:

- Esittelymalli

Käytetään tuotteen ulkomuodon, yleisen olemuksen ja päämittojen esittelyyn. Tämän mallin avulla voidaan herättää keskustelua idean onnistumisesta, toteuttamiskelpoisuudesta sekä kehittämistyön jatkamisesta. (Gebhardt 2003,16.)

- Geometrinen prototyyppi

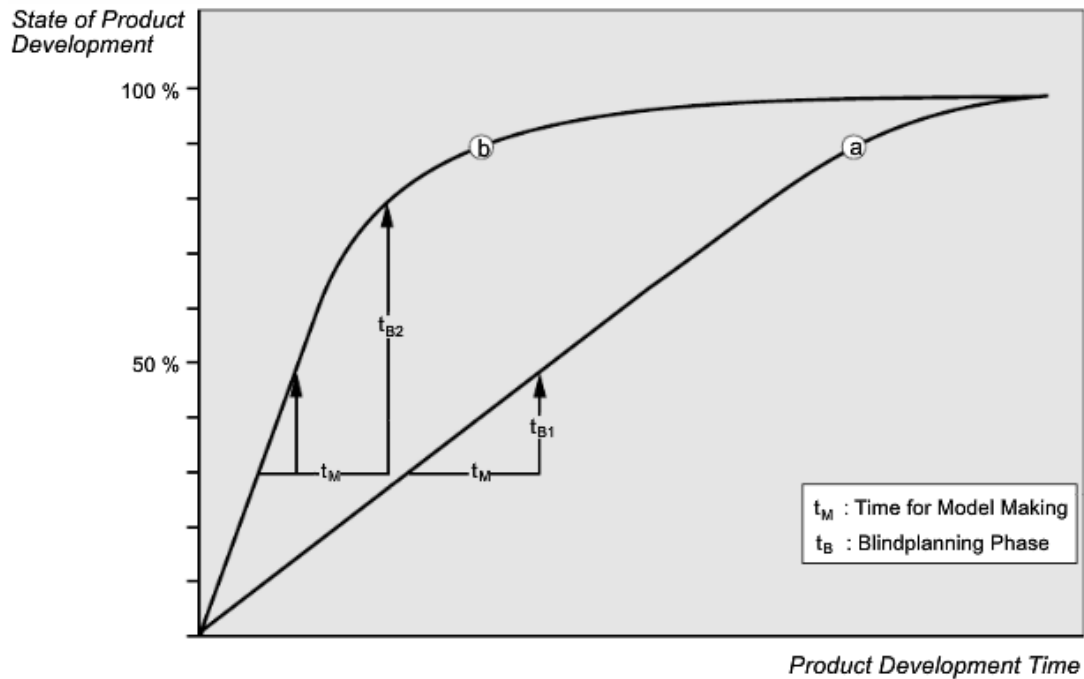
Voidaan käyttää tuotteen käsittelyn ja käytettävyyden testaamiseen sekä varhaiseen toimintojen testaukseen. Tuotteen ulkomuoto on viimeistelty, mukaan lukien pinnanlaadun vaatimukset. (Gebhardt 2003,16.)

- Toiminnallinen prototyyppi

Täysin sarjavalmisteista tuotettava vastaava malli, jota voidaan jo käyttää laskennallisten mittausten ja simulointien paikkansapitävyyden varmistamiseksi, sekä toimintojen tarkempaan tutkimiseen ja suunnitteluun, kuten kokoonpanon ja huollon suunnitteluun sekä kinemaattisiin testauksiin. Tätä mallia voidaan käyttää myös tuotteen markkinoinnissa sekä tuotanto- ja huoltohenkilöstön kouluttamisessa. (Gebhardt 2003,16.)

4.3.2 Pikamallinustekniikan nopeuden mahdollistamat hyödyt

Malleja ja prototyyppijä on käytetty osana tuotekehitysprosessia jo ennen pikamallinustekniikan kehitystä, mutta kuvio 13 selkeyttää pikamallinustekniikan tuomia hyötyjä mallien valmistuksen nopeuden suhteen (Gebhardt 2003,18).



KUVIO 13. Mallin tekemiseen kuluvan ajan vaikutus sokeansuunnitteluajan kestoon erinopeuksisissa tuotekehitysprosesseissa (Gebhardt 2003,18)

Kuviossa on kaksi käyrää, joista toinen (a) kuvaa suhdetta tuotekehitysprosessiin kulu-
neen ajan ja tuotekehitysprosessin tilan välillä tavallisessa tuotekehitysprosessissa ja
toinen jyrkempi käyrä (b) kuvaa erilaisilla toimenpiteillä nopeammaksi saatua tuoteke-
hitysprosessia. Nyt kun mietitään aikaa, joka kuluu mallin valmistamiseen, kuviossa
merkitty t_M , niin huomataan, että tuotekehitystä jatketaan ikään kuin *sokeana* mallin
valmistamiseen kuluvan ajan verran. Sillä jos malli paljastaakin jonkin huomattavan
puutteen suunnitelmissa, mikä voisi johtaa koko tuotekehitysprojeffin lopettamiseen,
niin kaikki työ, jota mallin valmistumisen ajan on tehty tuotekehityksen eteenpäin vie-
miseksi, on ollut turhaa ajan ja rahan haaskausta. Kuvaajassa tätä *Sokean suunnittelun*
vaihetta merkitään t_B :nä. Jos mallin valmistamisaika pysyy samana, niin tuotekehitys-
prosessin nopeutuminen tuo mukanaan jatkuvasti kasvavan suuremman sokean suunnit-
teluvaiheen aiheuttaman vaaran tuotekehitystyölle. Voidaan siis todeta, että tuotekehi-
tykseen kuluvan ajan lyhentämisen ehtona on se, että myös mallien valmistamiseen ku-
luva aika lyhenee. Mallien valmistamiseen kuluvan ajan lyhenemisestä hyödytään myös
ei-nopeutetussa tuotekehitysprosessin mallissa, sillä sokean suunnittelun vaiheen pituus
lyhenee. (Gebhardt 2003,18-19.)

Tuotekehityksessä törmätään usein ongelmaan, että tuotekehityksen edetessä on yhä
vaikeampaa vaikuttaa syntyviin kustannuksiin, vaikkakin kustannusten arviointi käy

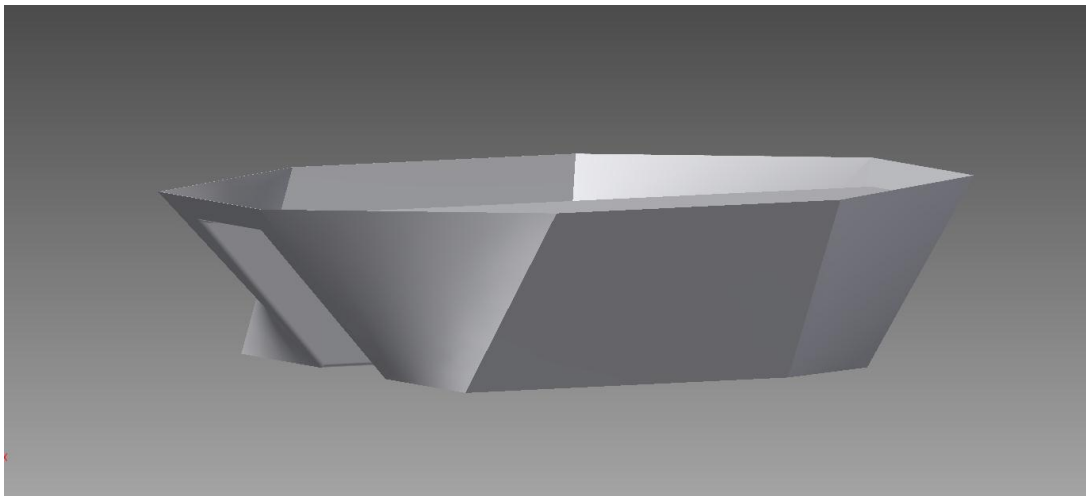
samanaikaisesti helpommaksi. Malleja käyttämällä, etenkin kun mallien valmistaminen ei vaadi huomattavia määriä tuotekehityksen voimavaroja, kustannuksia voidaan arvioida tarkemmin jo aikaisemmassa vaiheessa, jolloin myös kustannuksiin voidaan vielä vaikuttaa tehokkaasti. (Gebhardt 2003,19.)

Ympäristönsuojelun asettamat erityisvaatimukset, jotka tuotekehityksen tulee ottaa huomioon, ovat muun muassa tuotteen kierrätyksen ja hävittämisen suunnittelu. Nopeasti ja vaivattomasti tuotekehitystyön ohella valmistettujen mallien avulla tuotteen purkamisen ja ympäristöystävällisten pakkauksien suunnittelu ja testaus voidaan aloittaa aikaisemmassa vaiheessa tuotekehitysprosessia. (Gebhardt 2003,21.)

5 PIENOISMALLIN VALMISTAMINEN

Valmistettavaan pienoismalliin ei tulla sisällyttämään vaihteistoa, generaattoria ja muuta elektroniikkaa, vaan aaltoallaskokeita varten riittää, että pienoismallissa on kellukan runko, akseli, jonka ympärille köydet kelautuvat, sekä juoksupyörä, jonka kautta vastapainon köysi kulkee.

Pienoismallin mallinnukseen käytettiin *Autodesk Inventor 3D* -ohjelmistoa. Aaltoenergiakeräimen kellukasta oli jo olemassa CAD-mallit (kuvio 14), mutta ne vaativat jonkin verran muutoksia, ennen kuin niitä voitiin soveltaa pienoismallin valmistamisessa.

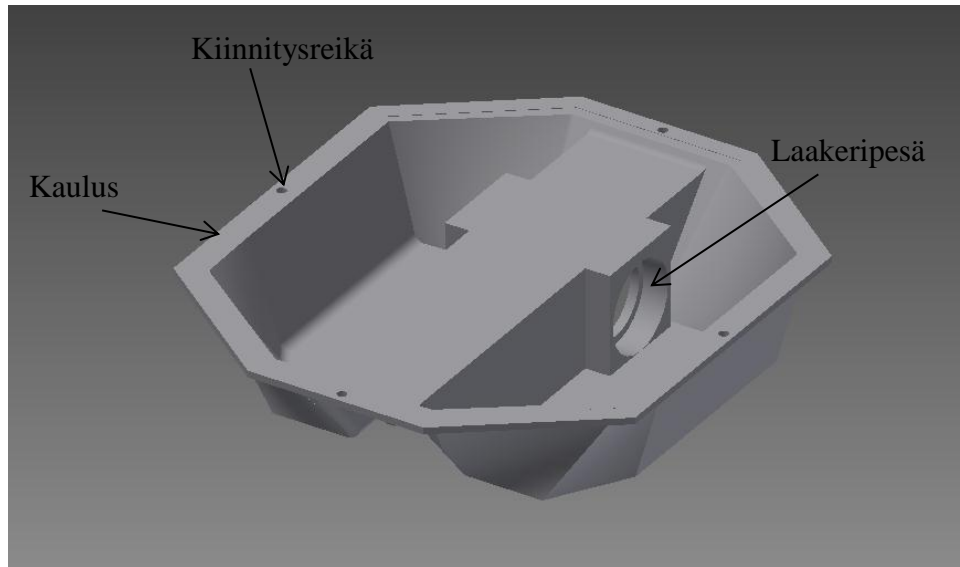


KUVIO 14. Alkuperäinen CAD-malli kellukan pohjasta (Projektitiimi 2015)

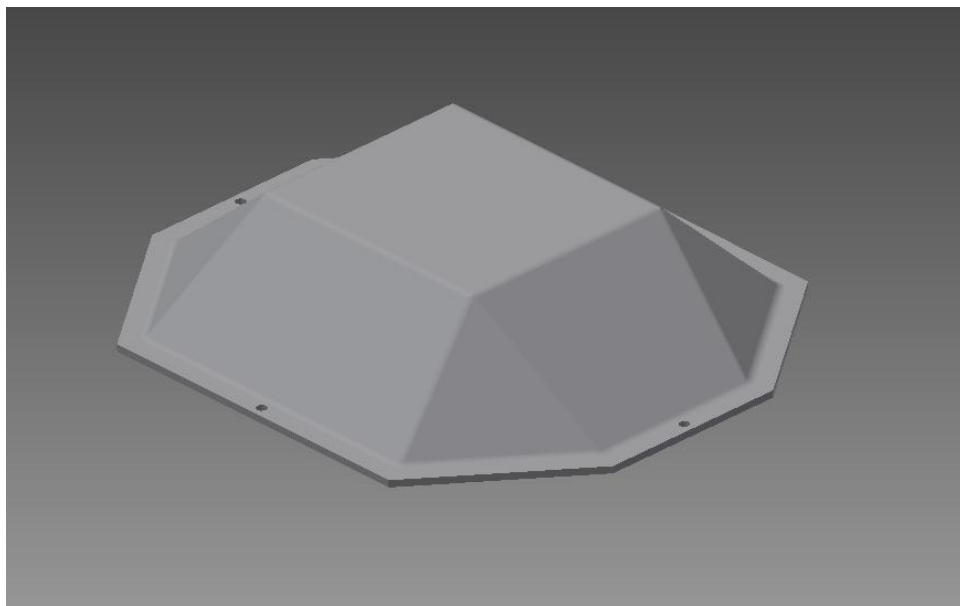
Koska oikeassa mittasuhteessa olevan kellukan runko oli jo valmistettu, muutin joitain vääränlaisia mittoja CAD-mallista, jotta ne vastaisivat paremmin fyysistä mallia ja täten myös pienoismallista tulisi mahdollisimman tarkka kopio täysimittaisesta prototyypistä. Kun mitat oli muutettu, vaihdoin mallin mittakaavan Inventorin *Derive*-toimintoa käyttäen noin 1:7,6:ksi. Mittakaavan valintaan vaikuttivat käytettävän aaltoaltaan leveys sekä laakereiden koko, joita olin suunnitellut pienoismallissa käyttäväni. Tarkoituksena oli tehdä pienoismallista mahdollisimman iso siten, että sen toimintaa olisi helppo tarkastella aaltoaltaassa ja että pienoismallilla olisi silti jonkin verran tilaa liikkua myös sivuttaissuunnassa aaltoaltaan laitojen välissä.

Pienoismallia varten mallinnuksen pohjana käytettyyn CAD-malliin mallinnettiin kellukan pohjan (kuvio 15) ja kannen reunoihin kaulukset, joihin mallinnettiin reiät kannen

ja pohjan yhteen kiinnitystä varten. Prototyypistä poiketen kannesta (kuvio 16) poistettiin huoltoluukku sen tarpeettomuuden vuoksi pienoismallin käyttötarkoitusta ajatellen.

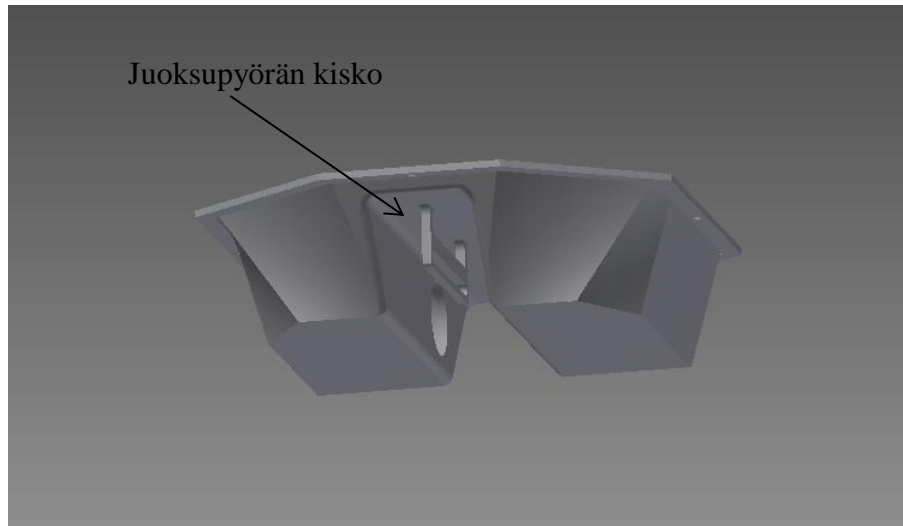


KUVIO 15. CAD-mallinnos kellukan pohjasta (Konsta Kilponen 2015)



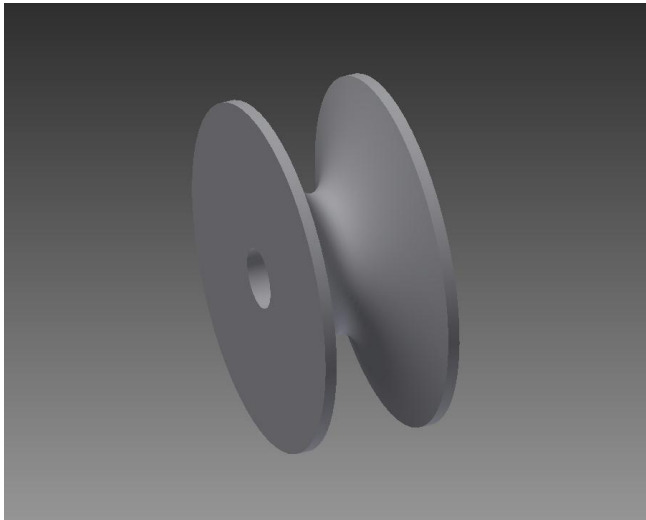
KUVIO 16. CAD-mallinnos kellukan kannesta (Konsta Kilponen 2015)

Jotta pienoismallin pohjasta ja kannesta tulisi tarpeeksi kestävä samalla huomioon ottaen pikamallinnukseen käytettävän laitteen tulostusominaisuudet, kasvatettiin seinämien paksuutta 3,6 mm paksuisiksi. Köysivoimia välittävää akselia varten mallinnettiin alkuperäisen mallin mukaisille paikoille laakeripesät, joihin laakerit pikamallinnuksen jälkeen liimattaisiin (kuvio 15). Negatiivisen kölin keskipaikkeille mallinnettiin kisko, jonka avulla juoksupyörän sijaintia voitaisiin vaihdella (kuvio 17).

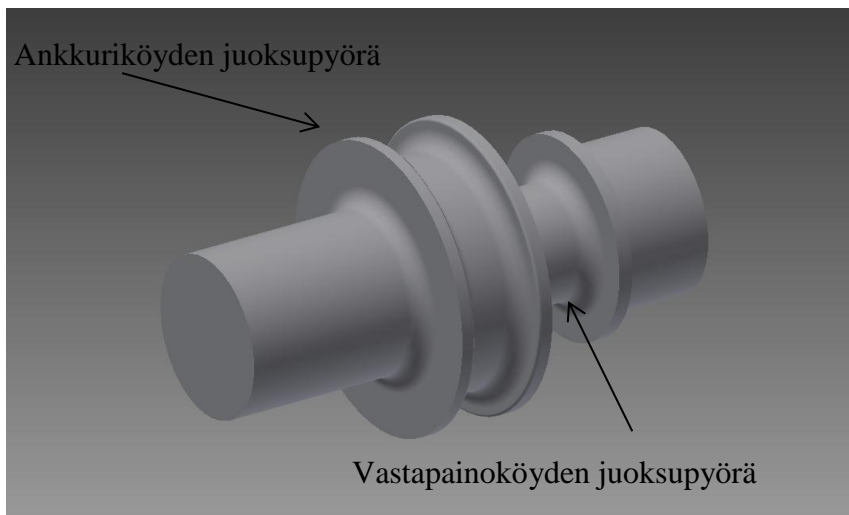


KUVIO 17.CAD-mallinnos kellukan pohjasta ja siinä olevasta juoksupyörän kiskosta (Konsta Kilponen 2015)

Päätin valmistaa myös juoksupyörän (kuvio 18) ja akselin (kuvio 19) pikamallintamalla. Aaltoenergiakeräimen prototyypissä akselille on kiinnitetty erilliset juoksupyörät ankkurin ja vastapainon köysiä varten, mutta pienoismalliin mallinsin nuo juoksupyörät samaksi kappaleeksi akselin kanssa, jolloin se olisi helppo valmistaa pikamallinnuslaitteella. Kuten prototyypissäkin niin myös pienoismallissa noiden akselilla olevien juoksupyörien halkaisijoiden suhde on 1:2, mikä tarkoittaa sitä, että kun isompi juoksupyörä pyöri akselinsa ympäri kerran samalla kelaten köyttä ympärilleen, niin pienemmän pyörän ympärilleen kelaaman köyden pituuden määrä on puolet isomman pyörän kelaamasta köyden pituudesta. Tämän vuoksi vastapainon liikkuma matka on aina puolet kellukan liikkumasta matkasta, mikä estää vastapainon kelaantumisen kiinni kellukkaan korkean aallon nostaessa kellukkaa ylöspäin sekä vastapainon törmäämisen meren pohjaan. Kiskoon kiinnitettävä juoksupyörä kuljettaa vastapainon köyden pois ankkuriköyden vierestä, jotta köydet eivät kiertyisi toistensa ympärille.

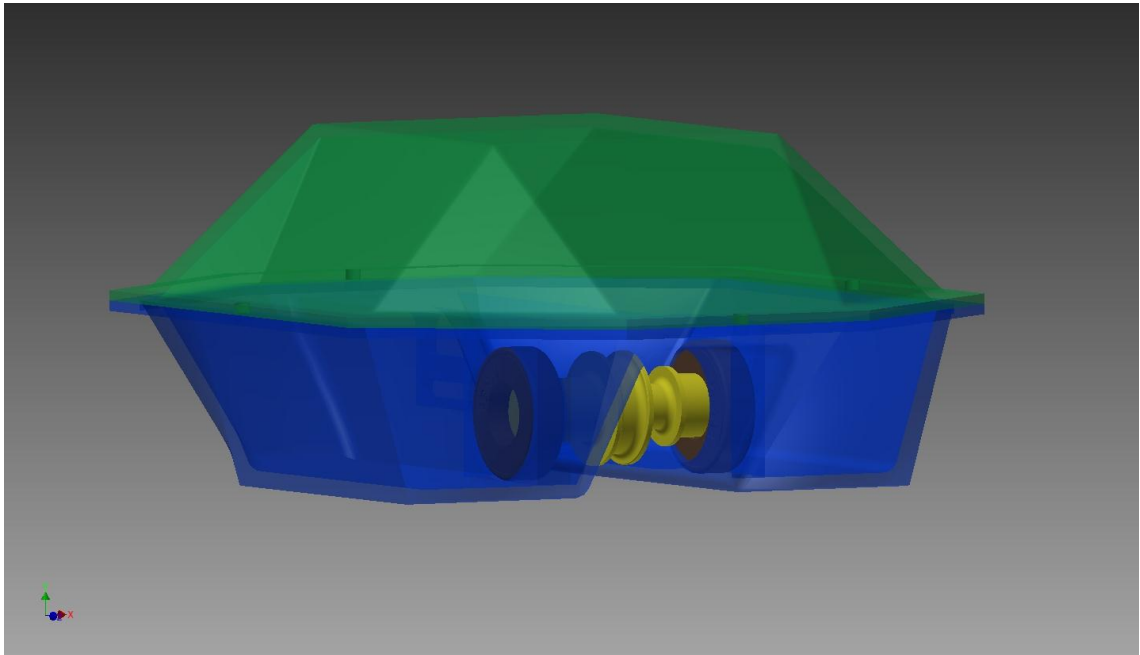


KUVIO 18. CAD-mallinnos juoksupyörästä (Konsta Kilponen 2015)

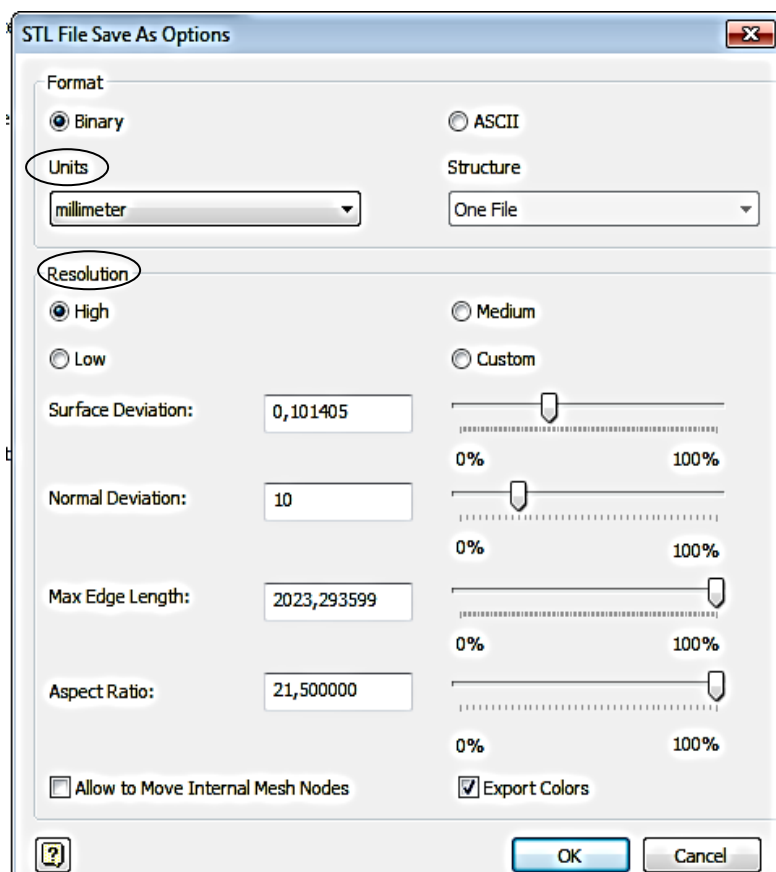


KUVIO 19. CAD-mallinnos akselista ja siihen mallinnetuista juoksupyöristä (Konsta Kilponen 2015)

Kun kaikki osat oli mallinnettu ja niiden yhteensopivuutta ja kokoonpantavuutta vielä tarkastelu muodostamalla kokoonpano laitteesta (kuvio 20), voitiin osien CAD-tiedostot muuntaa STL-tiedostoiksi. Se tapahtui Inventorin Export-valikon kautta, josta valittiin *CAD Format*. Tämän jälkeen vaihdettiin tallennettavan tiedoston tyyppiä STL, jonka jälkeen *Options*-välilehden (Kuvio 21) alta vaihdettiin mittayksiköiksi (*Units*) millimetrit ja vaihdettiin tulostin resoluutioksi (*Resolution*) *High*.



KUVIO 20. CAD-mallinnos aaltoenergiakeräimen kokoonpanosta (Konsta Kilponen 2015)



KUVIO 21. Autodesk Inventor -ohjelmiston STL-tiedoston asetusvalikko (Konsta Kilponen 2015)

Seuraavaksi STL-tiedostot siirrettiin USB-tikulle, jonka avulla tiedostot vietiin pikamallinnuslaitetta käyttävälle tietokoneelle. Pikamallintamiseen käytettiin Stratasys-

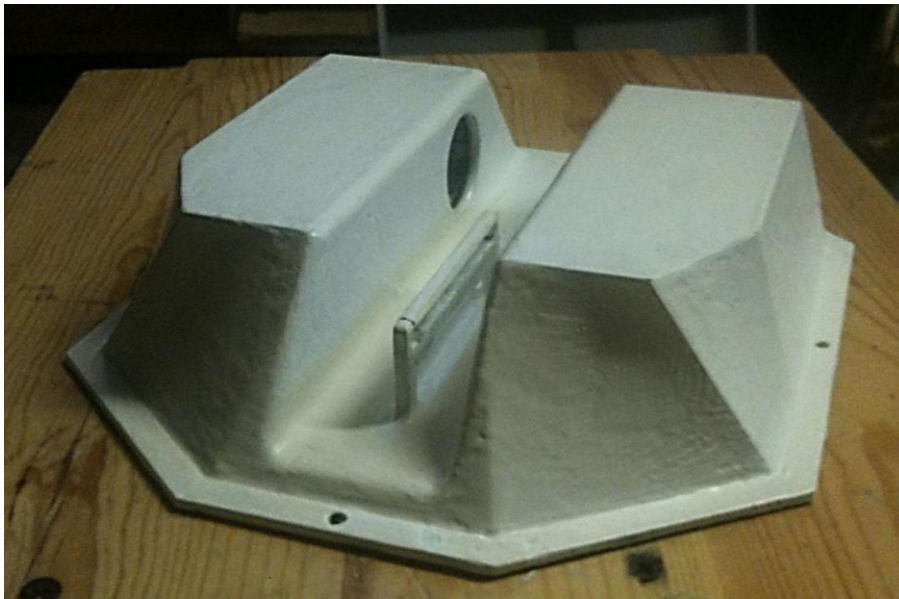
valmistajan Dimension Elite -mallista FDM-tekniikkaa hyödyntävää 3D-printteriä, jollainen Tampereen ammattikorkeakoululla on. Tietokoneelta avattiin CatalystEX-sovellus, jolla päästiin muokkaamaan tulostusasetuksia. Kerrospaksuudeksi (layer resolution) valittiin kahdesta valittavissa olevasta paksumpi 0.245 mm ja tulostettavan mallin rakenteiden sisuksien täytöksi (model interior fill style) valittiin Sparse Low Density, joka täyttää rakenteiden sisukset kennomaisesti. Nämä asetukset valittiin siksi, koska pienoismallista ei tarvinnut valmistaa pinnanlaadultaan erittäin hyvää (kerrospaksuuden asetukset) tai erityisen kestäväää ja lujaa (täytön asetukset). Samalla myös tulostusaikaa saataisiin lyhyemmäksi käyttämällä näitä asetuksia. Tukimateriaalinkäytön asetukseksi (support style) valittiin SMART, joka minimoi käytetyn tukimateriaalin määrän ja nopeuttaa tulostusaikaa.

Asetuksien valitsemisen ohella voitiin tarkastella kappaleiden tulostusorientaatioita, eli suuntia joissa kappaleet tulisivat tulostumaan tulostusalustalle. Tulostusorientaatiolla voidaan vaikuttaa kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin, sillä kappaleen lujuus- ja joustavuusominaisuuksissa on eroja vaaka- ja pystysuunnassa. Tässä kohtaa huomattiin, että pienoismallin pohja ja kansi eivät mahtuneet tulostumaan lappeellaan tulostusalustaa vasten, sillä tulostusalustan koko oli 203 x 203 x 305 mm. Koska en halunnut tehdä muutoksia pienoismallin mittoihin, oli ratkaisuna valita pohjan ja kannen tulostusorientaatio siten, että nuo osat tulostuisivat pystyssä. Näin tehtynä kaikki osat voitiin tulostaa samalla kertaa, mutta pystyssä tulostaminen vaati enemmän tukimateriaalin käyttöä mikä hieman pidensi tulostusaikaa. CatalystEX antoi lopulta tulostusajaksi 62 tuntia. Tämän jälkeen painettiin sovelluksen Print-näppäintä, jolloin sovellus loi kappaleista CMB-tiedoston, jota itse tulostin käyttäisi kappaleiden tulostamiseen. Kun tulostusalusta oli asetettu tulostimeen ja CMB-tiedosto lähetetty tulostimelle, voitiin aloittaa tulostaminen. Kun kappaleiden tulostusprosessi oli valmistunut, irrotettiin ne laitteen tulostusalustasta. Tämän jälkeen kappaleet siirrettiin lipeäaltaaseen, jossa tukimateriaalit sulivat pois kappaleista.

Seuraavaksi kappaleet pestiin huolellisesti, jottei lipeää joutuisi käsille kappaleita käsiteltäessä. Pesun jälkeen kappaleiden pinnoilta hiottiin hiomapaperilla isoimmat tulostuksen aikana syntyneet roskat pois, jonka jälkeen kappaleet maalattiin epoksimaalilla (kuva 1; kuva 2;kuva 3; kuva 4; kuva 5) vedenkestävyyden parantamiseksi pienoismallin loppukäyttöolosuhteet huomioon ottaen.



KUVA 1. Epoksimaalilla maalattu pikamallinnettu pohja (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 2. Epoksimaalilla maalattu pikamallinnettu pohja (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 3. Epoksimaalilla maalattu pikamallinnettu kansi (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 4. Epoksimaalilla maalattu pikamallinnettu akseli (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 5. Epoksimaalilla maalattu pikamallinnettu juoksupyörä (Konsta Kilponen 2015)

Pienoismallissa käytettäviksi laakereiksi valittiin FAG:n valmistamat 6003-2RSR urakuulalaakerit (kuva 6), jotka olivat molemmilta puolilta tiivistetty kumitiivisteillä, mikä

mahdollisesti niiden käytön tässä sovelluksessa, jossa laakerit joutuisivat olemaan veden kanssa kosketuksissa. Laakerit kiinnitettiin liimaamalla laakeripesiin. Myös akseli liimattiin päistään laakereihin.



KUVA 6. Pienoismallissa käytetyt laakerit (Konsta Kilponen 2015)

Vastapainon köyttä varten valmistettu juoksupyörä kiinnitettiin ruuvilla ja muttereilla kellukan pohjassa olevaan kiskoon. Akselilla oleviin juoksupyöriin porattiin reiät, jotta köönsien virkaa pienoismallissa toimittavat siimat saatiin kiinnitettyä.

Vastapaino kiinnitettiin siiman toiseen päähän ja ankkurisiima kiinnitettiin ankkuriin, jonka jälkeen pystyin testaamaan siimojen akselin ympärille kelautuvuuden toimivuutta. Testissä huomasin, että käytetyt laakerit vastustivat liikaa vastapainon kelautumisliikettä. Kelautuvuuden parantamiseksi irrotin kellukan sisäpuoliset tiivisteet laakereista, jolloin akselin liikettä saatiin hieman herkemmäksi ja vastapaino alkoi pudotessaan kelata siimaa.

Jotta kellukan pohjan ja kannen välistä ei vuotaisi vettä sisälle kellukkaan, liimasin tiivisteiden pohjaosan kaulukseen. Nyt pienoismallin kokoonpano oli valmis.

6 AALTOALLASKOKEET

6.1 Yleistä aaltoallaskokeista

Nesteessä kelluvien laitteiden tai kappaleiden liikkeen tutkiminen voitaisiin aloittaa numeerista virtausdynamiikkaa (Computational Fluid Dynamics, CFD) hyväksikäyttäen. Tällöin kelluvan laitteen liikettä ja käyttäytymistä nesteessä voitaisiin simuloida tähän tarkoitukseen tehdyllä tietokoneohjelmalla ennen kuin siirrytään suorittamaan kokeita pienoismallilla aaltoaltaassa tai avomeri- tai järviolosuhteissa. CFD-ohjelmalla olisi helppo kokeilla eri versioita suunnittelutyön alla olevasta laitteesta, jolloin välttäisiin toimimattoman laitteen pienoismallin suunnittelu- ja valmistuskustannuksilta. (Cruz 2008, 133.) Koska tämän opinnäytetyön kirjoittajalla ei ole tarpeeksi tietoa virtausmekaniikasta, ei tällaisia tietokoneavusteisia tutkimuksia tulla tämän opinnäytetyönpuiteissa suorittamaan.

Aaltoenergiakeräimien pienoismallien aaltoallaskokeissa tulee ottaa huomioon mittakaavavaikutukset (scale effects). Laboratorio-olosuhteista johtuen jotkin mittakaavavaikutuksesta johtuvat ilmiöt voivat aiheuttaa sen, että pienoismallille suoritettujen testien tulokset eivät ole täysin verrattavissa todellisen kokoisen laitteen toimintaan. Eräs tällainen huomioonotettava ilmiö, jonka merkitys kasvaa etenkin kun testejä suoritetaan pienenmittakaavan pienoismalleille, on nesteen viskositeetti. Viskositeetti kuvaa muun muassa nesteiden ja kaasujen kykyä vastustaa virtausta. Muita huomioon otettavia ilmiöitä ovat epälineaaristen aaltojen vaikutukset sekä turbulenssi, joita on vaikea saada aikaan aaltoallaskokeissa. Myös kaapeleista ja rakenteista aiheutuvien virtauksien pyörrevanojen vaikutukset eivät välttämättä anna oikeanlaista kuvaa verrattaessa tuloksia todellisen kokoisen laitteen toimintaan. Periaatteessa tällaisten mittakaavavaikutuksien huomioon ottamatta jättäminen laboratoriokokeissa voisi johtaa yllättäviin ongelmiin siirryttäessä testaamaan todellisen kokoista laitetta. (Cruz 2008, 164, 167-168.)

6.2 Aaltoallas

Kokeissa käytettävä aaltoallas (kuva 7) on valmistettu aikaisemmin opinnäytetyönä tätä TAMK:in Aaltoenergiahanketta varten. Aaltoallas valmistettiin aaltoenergian talteenototapojen tutkimiseksi pienoismallitasolla. Allas on pituudeltaan 247,0 cm, leveydeltään 22,5 cm ja korkeudeltaan 70,0 cm. Aalto synnytetään altaaseen kiilan (kuva 8) avulla, jota moottorikokoonpano liikuttaa edestakaisin ylös alas. Kiilan kulma on säädettävissä

viiden asteen askelin 15- ja 45-asteen välillä. Kiilan kulmaa suurentamalla voidaan aallon pituutta kasvattaa.



KUVA 7. Aaltoallas (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 8. Aallon synnyttävä kiila (Konsta Kilponen 2015)

Vastakkaisessa päässä kiilaa on aallonvaimennin (kuva 9), jonka tarkoitus on pysäyttää aalto ja estää sitä heijastumasta takaisinpäin. Heijastunut aalto häiritsisi synnytettyä tasaista aaltoa, jolloin aallosta tulisi epävakaa ja samalla testien tuloksiin syntyisi paljon virhettä. Aallonvaimentimena toimii 45-asteen kulmaan asennettu levy, jonka etupuolelle on kiinnitetty vaahtomuovista leikattu kiilanmallinen pala. Aallonvaimennus perustuu tässä ratkaisussa siihen, että aalto joutuu kiipeämään vaahtomuovipalan ylitse samalla hukaten energiansa. Vaahtomuovipalan alla olevasta raosta vesi pääsee virtaamaan tasaisesti pois kiilan takapuolelta, jolloin uudet synnytyt aallot eivät häiriinny.



KUVA 9. Aallonvaimennin (Konsta Kilponen 2015)

Synnytetävän aallon korkeutta ja pituutta voidaan säätää moottorilaitteistoon kytketyn taajuusmuuttajan (kuva 10) kautta. Taajuusmuuttajan säätimellä (kuva 11) voidaan säätää kiilaa liikuttavan moottorin pyörimisnopeutta, jolloin myös kiilan liikenopeus muuttuu. Nopeutta nostettaessa altaaseen syntyvän aallon korkeus kasvaa ja aallon pituus lyhenee.



KUVA 10. Taajuusmuuttaja (kuvassa vasemmalla) (Konsta Kilponen 2015)



KUVA 11. Aaltolaitteiston säätimet (Konsta Kilponen 2015)

6.3 Koejärjestelyt ja lähtökohdat

Projektin aaltoenergialaitteen toiminnan ominaisuudet, jotka näissä aaltoallaskokeissa haluttiin selvittää, olivat

- laitteen reagoiminen erilaisiin aaltoihin ja
- vastapainon eri sijaintien vaikutukset laitteen vakauteen ja tasapainoon.

Samalla pyrittiin saamaan yleistä varmuutta konseptin toimivuudesta, niin kellukan muotoratkaisun kuin myös vastapainosysteemin toiminnan osalta.

Laitteen aallosta keräämän energian määrä optimoituu silloin, kun laite nousee aallon mukana aallon huipulle asti. Jos laite ei nouse aallon mukana, vaan sukeltaa aallon läpi, jää osa saatavilla olevasta energiasta keräämättä. Tästä syystä pyritään selvittämään, onko vastapainon sijainnilla merkitystä laitteen aallolla nousukyvyille.

Laitetta suunnitellut työryhmä on käyttänyt mitoittamisessa merkitsevän aallonkorkeuden (H_s) arvona 1,2 m. Tällöin keskimääräinen aallonkorkeus (H_m) saadaan, kun kerrotaan merkitsevän aallonkorkeuden arvo kahdella kolmasosalla (kaava 3).

$$H_m = \frac{2}{3} \cdot H_s = 0,8m \quad (3)$$

Teoreettinen korkein aallonkorkeuden mahdollinen arvo (H_{max}) suhteessa merkitsevään aallonkorkeuteen on kaksi kertaa merkitsevä aallonkorkeus (kaava 4).

$$H_{max} = 2 \cdot H_s = 2,4m \quad (4)$$

Edellä mainittuja aallonkorkeuksia (H_s , H_m ja H_{max}) olisi siis järkevää käyttää laitteelle suoritettavissa aaltokokeissa.

Koska pienoismallin mittasuhte verrattuna laitteen prototyyppiin on 1:7,6, olisi kokeissa käytettävien aaltojen korkeudet pienoismallille skaalattuna seuraavanlaiset:

$$H_{m.Skaalattu} = \frac{H_m}{7,6} = 0,105m \quad (5)$$

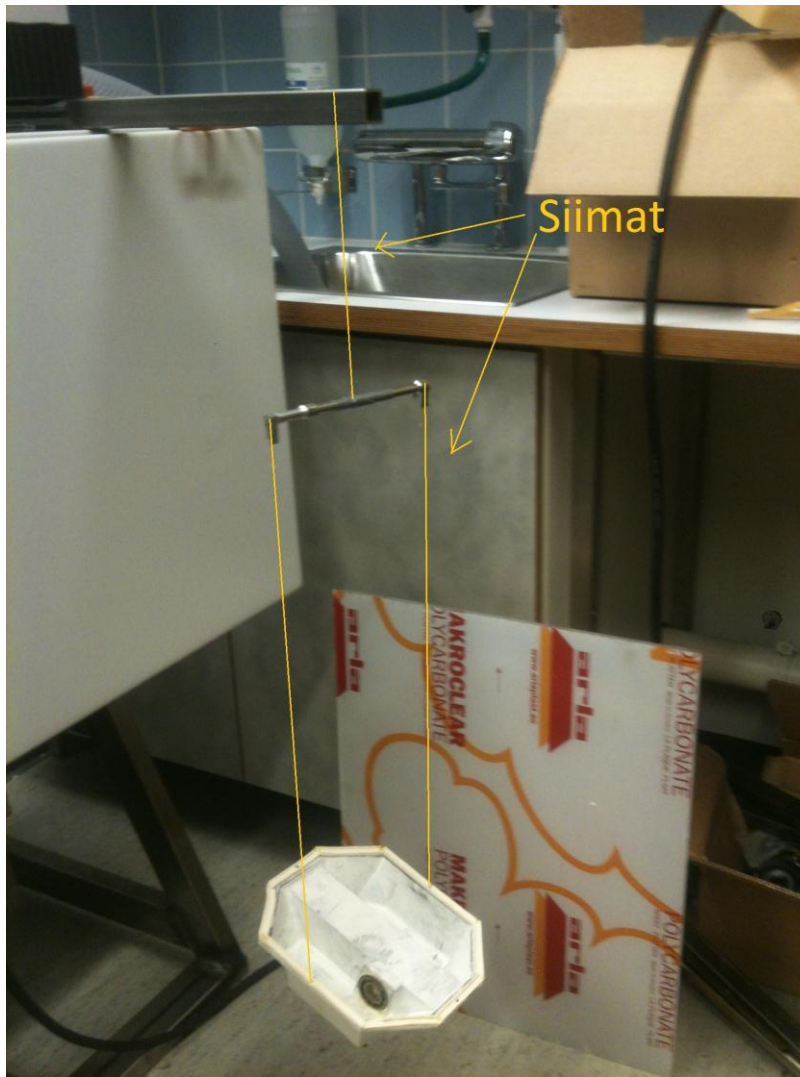
$$H_{s.Skaalattu} = \frac{H_s}{7,6} = 0,158m \quad (6)$$

$$H_{max.Skaalattu} = \frac{H_{max}}{7,6} = 0,316m \quad (7)$$

6.4 Toteutus

Aluksi selvitin kuinka korkeita aaltoja aaltoallaslaitteistolla voidaan tuottaa. Aaltoja tuottavan kiilan kulmaa, moottorin pyörimisnopeutta ja veden pinnankorkeutta muuttamalla, sain lopulta aikaan maksimissaan vain noin 10 cm korkuisen aallon. Samalla huomasin, ettei laitteistossa käytetty aallonvaimennin toiminut tarpeeksi hyvin, vaan syntynyt aalto heijastui jossain määrin takaisin samalla häiriten synnytettyjen aaltojen tasaisuutta. Tästä huolimatta päädyin jatkamaan kokeita käyttämällä saavutettua 10 cm korkuista aaltoa, sillä vaikka korkeampia aaltoja ei pystytä testaamaan, niin saataisiin silti alustavaa tietoa aaltoenergiakeräimen toiminnasta ja käyttäytymisestä edes jonkinlaisessa aaltokohtaamisessa.

Ennen kuin siirryin pienoismallin tarkasteluun aaltoaltaassa, suoritin pienoismallille tasapainotuksen kuvan 13 mukaisella siimoista ja metalliputkista rakennetulla tasapainotusjärjestelyllä.



KUVA 12. Tasapainotusjärjestely (Konsta Kilponen 2015)

Pienoismalli jäi laakereiden painon vuoksi hieman etupainoiseksi, joten korjasin tätä painojakauman eroa liimaamalla lyijypainoja sopiviin kohtiin (kuva 14).



KUVA 13. Tasapainotuslyijypainot kellukan pohjalla (Konsta Kilponen 2015)

Näin pienoismalli saatiin tasapainotettua (kuva 15) ja samalla painopistettä hieman alemmaksi, kuten täysimittaisessa prototyypissä sen sisältämien laitteiden sijoittelun vuoksi.



KUVA 14. Tasapainotettu kellukka (Konsta Kilponen 2015)

Pienoismallin painoa lisäämällä myös pienoismallin ja prototyypin tilavuuden ja painon suhdetta saatiin samankaltaisemmaksi, jolloin pienoismallille suoritettujen aaltoallasko-keiden vastaavuus todelliseen kokoisen laitteen toimintaan paranee. Pienoismallin painoksi tuli lopulta 893 grammaa.

Nyt kun pienoismallin painojakauma oli tasapainossa, aloitettiin aaltoallaskokeet. Kokeet jaettiin kolmeen eri vaiheeseen juoksupyörän sijainnin mukaan (kuva 16):

- juoksupyörä mahdollisimman lähellä akselia
- juoksupyörä kiskon keskikohdassa
- juoksupyörä mahdollisimman kaukana akselista.

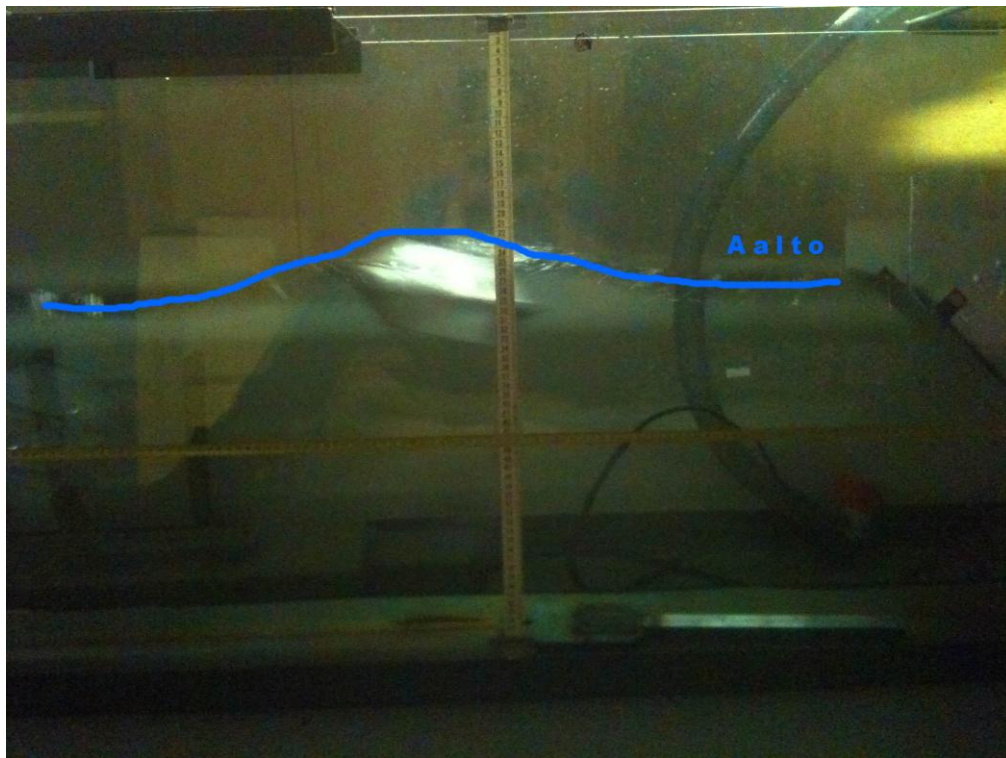


KUVA 15. Juoksupyörä kiskolla mahdollisimman lähellä akselia (Konsta Kilponen 2015)

Siimoja kelattiin akselin juoksupyörien ympärille alustavasti siten, että ankkurille menevää siimaa oli juoksupyörän ympärillä riittävästi, jotta kellukka pystyy nousemaan aallon mukana ilman että siiman pituus loppuisi kesken. Myös vastapainolle menevää siimaa kelattiin akselille sen verran, että vastapaino roikkuisi sopivalla korkeudella ilman mahdollisuutta kelaautua kellukan pohjaa vasten. Sitten ankkurille menevä siima kiinnitettiin ankkuriin. Jo tässä kohtaa huomattiin, että 377 gramman painoinen vastapaino aiheutti lievää epätasapainoa kellukkaan. Toisaalta kevyempääkään vastapainoa ei voitu käyttää, sillä kevyempi vastapaino ei olisi riittänyt kelaamaan ankkurisiimaa takaisin akselin ympärille aallon mukana nousemisen jälkeen.

6.4.1 Juoksupyörä mahdollisimman lähellä akselia

Kun aaltoa synnyttävä laitteisto käynnistettiin, huomattiin heti, ettei tämä juoksupyörän sijainti ollut kovin edullinen. Vastapainon sijainnista johtuen etupainoinen kellukka sukelsi aallon läpi (kuva 17) ja pyrki myös kääntyilemään aallon etenemissuuntaan nähden poikittain. Vastapainon siima sotkeutui muutamaan otteeseen ankkurisiiman kanssa, jolloin ne jouduttiin irrottamaan toisistaan.



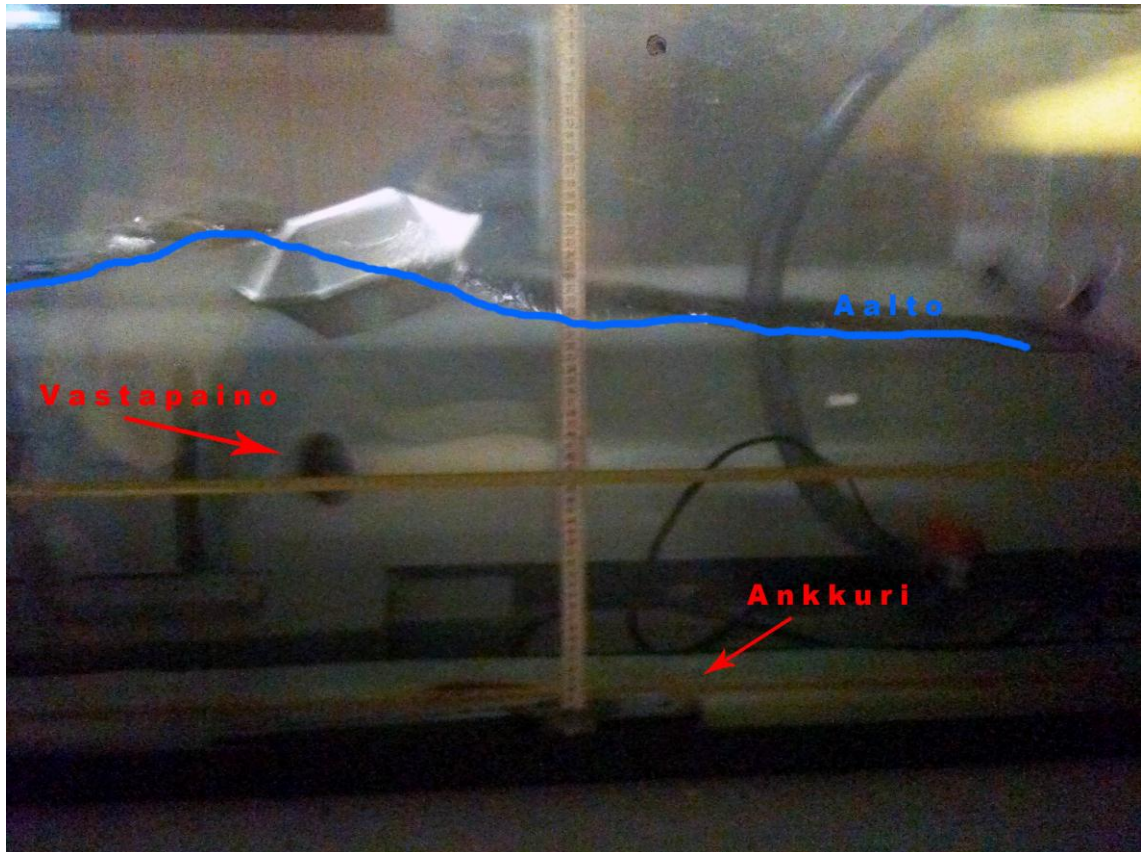
KUVA 16. Juoksupyörä mahdollisimman lähellä akselia (Konsta Kilponen 2015)

6.4.2 Juoksupyörä kiskon keskikohdassa

Tässäkin tapauksessa kellukka jäi hieman etupainoiseksi, eikä noussut halutulla tavalla aallon mukana. Siimat eivät kuitenkaan päässeet sotkeutumaan. Suuntavakaus oli edellistä tilannetta parempi.

6.4.3 Juoksupyörä mahdollisimman kaukana akselista

Nyt kellukka jäi hieman takapainoiseksi. Kellukka nousi hyvin aallon mukana ja suuntavakaus oli hyvä (kuva 18). Juoksupyörien pitkän välimatkan johdosta siimat eivät olleet lähelläkään sotkeutumista.



KUVA 17. Juoksupyörä mahdollisimman kaukana akselista (Konsta Kilponen 2015)

6.4.4 Muita huomioita

Vastapainon avulla tuotettu takaisinkelaussysteemi toimi halutulla tavalla. Välillä kävi kuitenkin niin, että ankkurisiima pääsi hyppäämään pois juoksupyörältään, mikä johti siiman kelautumiseen akselin ympärille, jolloin siima piti käsin kelata takaisin oikealle paikalleen.

6.5 Yhteenveto

Hankkeen aaltoenergiakeräimen konsepti on näiden kokeiden perusteella toimiva. Laite kykenee toimimaan ainakin hieman mitoituksessa käytettyä merkittävää aallonkorkeutta matalimmissa aalloissa. Aallon mukana nousukyvyltään ja suuntavakaudeltaan paras vaihtoehto on sijoittaa vastapainon juoksupyörä mahdollisimman kauas akselista. Takapainoisuudella oli selkeä positiivinen vaikutus laitteen toimintakykyyn.

Näiden kokeiden antamia tuloksia sovellettaessa täysikokoiseen prototyypin toimintaan ja sen jatkosuunnitteluun tulee kuitenkin ottaa huomioon seuraavia asioita: mittakaava-vaikutukset sekä käytetyn vastapainon suurehko massa suhteessa pienoismallin painoon voivat aiheuttaa sen, etteivät tulokset ole täysin verrattavissa täysikokoisen laitteen toimintaan. Myös aaltoaltaan aallonvaimennuksen toimimattomuuden vuoksi aiheutuneet vasta-aallot saattoivat aiheuttaa virhettä kokeen tuloksiin.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön alussa määritellyt työn tavoitteet onnistuivat hyvin. Saatiin valmistettua pienoismalli, jolle voitiin suorittaa kokeita aaltoaltaassa. Pikamallinnustekniikkaa hyväksi käyttäen pienoismallin valmistaminen kävi helposti ja nopeasti, vaikkei työn tekijällä ollut juuri minkäänlaista kokemusta pikamallinnuslaitteiden käyttämisestä ennakkoon. Suoritettujen aaltoallaskokeiden perusteella voidaan jatkaa valitun konseptin kehitystyön eteenpäin viemistä ja siirtyä myöhemmin myös täysimittaisen prototyypin toiminnan tarkasteluun meriolosuhteissa.

Jos aaltoallaskokeilla haluttaisiin saada tarkempia tuloksia pienoismallin käyttäytymisestä aalloissa, tulisi aaltoaltaan toimintaa parantaa. Aaltoaltaan aallonvaimennus ei toimi toivotulla tavalla, vaan aallot heijastuvat altaan takaseinästä häiriten uusia aaltoja. Aallontuottamislaitteisto ei myöskään kyennyt tuottamaan tarpeeksi korkeita aaltoja, jotta pienoismallin toimintaa olisi voitu tarkastella korkean aallon aiheuttamassa ääritilanteessa. Periaatteessa nykyinen aallontuottamislaitteistokin voisi riittää, jos tehtäisiin uusi vielä pienempi pienoismalli, mutta silloin mittakaavavaikutukset kasvaisivat entisestään.

Jatkoa ajatellen voisi olla hyvä idea simuloida aaltoenergiakeräimen konseptin toimivuutta tietokoneella numeerista virtausdynamiikkaa hyväksi käyttäen. Tällöin voitaisiin saada alustavia tuloksia konseptin käyttäytymisestä esimerkiksi hyökyaalto kohtaamisessa, jollaista voisi olla vaikea päästä testaamaan meriolosuhteissa suoritetuissa kokeissa.

LÄHTEET

Gebhardt, A. 2003. Rapid Prototyping. Munich: Hanser Publishers.

Gibson, I., Rosen, W. & Stucker, B. 2010. Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer.

Bryden, D. 2014. CAD and Rapid Prototyping for Product Design. Lontoo: Laurence King Publishing Ltd.

Raymond, A & Lewis, T. 2008. Wave Energy. Teoksessa Letcher, T. (ed.) Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet. Oxford: Elsevier Ltd, 129–149.

Cruz, J. 2008. Ocean Wave Energy. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Combarous, M. & Bonnet, J. 2008. World Thirst for Energy: How to Face the Challenge. Teoksessa Hanjalic, K, van de Krol. R. & Lekic, A. (ed.) Sustainable Energy Tehcnologies: Options and Prospects. Netherlands: Springer. 3-24.

Kazmer, D. 2007. Injection Mold Design Engineering. Munich: Hansel Publishers.