



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Juho Pekkanen

Aaltoenergiateknologiat ja niiden taloudellinen kannattavuus

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Sähkö- ja energiatekniikka, kandidaatintutkielma
Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Juho Pekkanen		
Tutkielman nimi:	Aaltoenergiateknologiat ja niiden taloudellinen kannattavuus		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma		
Opintosuunta:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Teemu Ovaska		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	24

TIIVISTELMÄ:

Siirtymä kohti vähäpäästöistä sähköntuotantoa on vauhdittanut uusiutuvien energialähteiden kehittämistä. Tuuli- ja aurinkoenergia ovat jo vakiinnuttaneet asemansa, mutta merienergian, erityisesti aaltoenergian, merkittävä potentiaali on yhä suurelta osin hyödyntämättä. Tämän tutkielman tavoitteena on esitellä keskeisiä aaltoenergiateknologioita ja arvioida aaltoenergian taloudellista kannattavuutta sitä kuvaavan tasoitettun energiakustannuksen avulla.

Työssä esitellään aaltoenergian synty ja fysikaalinen toimintaperiaate sekä tarkastellaan keskeisiä aaltoenergiamuuntimia, kuten pisteabsorboijia, vaimentavia laitteita, ilmakammiojärjestelmiä sekä vaakaliikkeeseen perustuvia järjestelmiä. Lisäksi työssä tarkastellaan keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat aaltoenergian energiantuotannon yksikkökustannukseen. Näitä ovat erityisesti investointi- ja käyttökustannukset, energiantuotannon määrä, kapasiteettikerroin, teknologian kehitysvaihe sekä mahdollisuudet hyödyntää mittakaavaetuja ja yhteistä infrastruktuuria hybridijärjestelmissä.

Tutkimuksen perusteella aaltoenergia näyttäytyy lupaavana uusiutuvana energianlähteenä, mutta sen laajamittaista hyödyntämistä rajoittavat edelleen merkittävät teknologiset ja taloudelliset haasteet. Aaltoenergian keskeisiä etuja ovat korkea energiatiheys, suhteellisen hyvä ennustettavuus, laaja esiintyvyys merialueilla sekä vähäinen maankäytön tarve. Lisäksi aaltoenergian yhdistäminen muihin uusiutuviin energianlähteisiin voi tasoittaa energiantuotantoa ja tarjota mahdollisuuksia asennus-, käyttö- ja kunnossapitokustannusten alentamiseen.

Taloudellinen tarkastelu osoittaa kuitenkin, että aaltoenergian tuotantokustannukset ovat edelleen selvästi korkeammat kuin vakiintuneilla uusiutuvilla energialähteillä, kuten tuuli- ja aurinkovoimalla. Vaikka aaltoenergian kustannukset ovat viime vuosina laskeneet, sen LCOE-arvot ovat edelleen huomattavasti korkeampia kuin esimerkiksi tuuli- ja aurinkoenergialla, mikä heikentää sen kilpailukykyä nykyisillä sähkömarkkinoilla.

AVAINSANAT: Aaltoenergia, energiantuotanto, yksikkökustannus, aaltoenergiamuuntimet, uusiutuva energia

Sisällys

1	Johdanto	5
2	Aaltoenergian toimintaperiaate	6
3	Nykyiset teknologiat	7
3.1	Pisteabsorboijat	7
3.2	Vaimentavat laitteet	8
3.3	Ilmakammiojärjestelmät	9
3.4	Vaakaliikkeeseen perustuvat järjestelmät	10
3.5	Upotetut paine-erojärjestelmät	11
3.6	Hybridijärjestelmät	12
4	Aaltoenergian taloudellinen kannattavuus	14
4.1	LCOE-mittari	14
4.2	Investointi- ja käyttökustannukset	15
4.3	Energiantuotanto ja kapasiteettikerroin	16
4.4	Teknologian kypsyys ja mittakaavaedut	17
4.5	Hybridijärjestelmät ja kustannusten alentaminen	18
5	Tulokset ja pohdinta	19
6	Johtopäätökset	20
7	Yhteenveto	21
	Lähteet	22

Kuvat

- Kuva 1. (a) Pisteabsorboijaan perustuva aaltoenergiamuunnin, jossa aallokon pystysuuntainen liike muunnetaan sähköenergiaksi, (b) PowerBuoy-aaltoenergiamuunnin (Zheng ja muut, 2020; Falcão, 2010). 8
- Kuva 2. (a) Pelamis Wave Energy Converter -aaltovoimapuisto, (b) nivelöidyn rakenteen toimintaperiaate. (Falcão, 2010; Henderson, 2006). 9
- Kuva 3. (a) Oscillating Water Column -ilmakammiojärjestelmä, jossa aallokon aiheuttama vedenpinnan värähtely synnyttää ilmapirran turbiinin läpi sähköntuotantoa varten, (b) Mutrikun OWC-aaltoenergialaitos (Falcão, 2010; Rosati ja muut, 2022). 10
- Kuva 4. (a) Oscillating Surge Wave Converter -aaltoenergiamuunnin, joka hyödyntää aallokon vaakasuuntaista liikettä, (b) Oyster-aaltoenergiamuunnin (Benites-Munoz ja muut, 2020; Marine Energy Research, City University of Hong Kong, n.d.). 11
- Kuva 5. (a) Upotettuun paine-eroon perustuva aaltoenergiamuunnin, jossa aallokon aiheuttamat vedenpaineen vaihtelut liikuttavat vedenalaista rakennetta, (b) Archimedes Waveswing -aaltoenergiamuunnin (Farrok ja muut, 2024; Miller, 2013). 12
- Kuva 6. Poseidon-hybridijärjestelmä, jossa yhdistyvät tuuliturbiinit sekä oskilloivaan runkoliikkeeseen ja OWC-tekнологiaan perustuvat aaltoenergiamuuntimet (McTiernan ja muut (2020). 13

Lyhenteet

IRENA	International Renewable Energy Agency
LCOE	Levelised Cost of Energy
NOOA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OSC	Oscillating Surge Converter
OWC	Oscillating Water Column
PTO	Power Take-off
USGS	United States Geological Survey

1 Johdanto

Energiasektorin murros kohti vähäpäästöistä sähköntuotantoa on lisännyt kiinnostusta uusiutuviin energialähteisiin. Vaikka tuuli- ja aurinkoenergia ovat jo laajasti käytössä, merienergian, kuten aaltoenergian, potentiaali on vasta osittain hyödynnetty (IRENA, 2020).

Aaltoenergia perustuu tuulen synnyttämien aaltojen sisältämään liike-energiaan, joka voidaan muuntaa mekaanisen ja sähköisen muunnosprosessin kautta sähköenergiaksi (López ja muut, 2013). Aaltoenergiaa voidaan hyödyntää laajoilla merialueilla, jotka kattavat merkittävän osan maapallon pinta-alasta (López ja muut, 2013; USGS, 2019).

Aaltoenergian hyödyntämismahdollisuuksia lisäävät sen korkea energiatiheys, hyvä ennustettavuus sekä laaja esiintyvyys merialueilla. Aaltoenergian energiatiheys on noin 2–3 kW/m², mikä on suurempi kuin tuuli- ja aurinkoenergialla. Lisäksi aallot voivat kulkea pitkiä matkoja pienillä energiahäviöillä, mikä parantaa niiden hyödyntämispotentiaalia energiantuotannossa (López ja muut, 2013).

Työn tavoitteena on esitellä keskeisiä aaltoenergiateknologioita ja tarkastella aaltoenergian taloudellista kannattavuutta tasoitetun energiakustannuksen (LCOE, Levelised Cost of Energy) avulla. Tarkastelu rajataan aaltoenergiateknologioihin, eikä muita merienergiamuotoja, kuten vuorovesi- tai merilämpöenergiaa, käsitellä. Lisäksi työssä tarkastellaan keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat aaltoenergian energiantuotannon yksikkökustannukseen ja teknologian kilpailukykyyn.

2 Aaltoenergian toimintaperiaate

Aallot syntyvät pääosin tuulen vaikutuksesta. Tuulen puhaltaessa merenpintaan tuulen liike-energia siirtyy veden liike-energiaksi, jolloin vedenpintaan alkaa muodostua aaltoja. Mitä voimakkaampi tuuli, pidempi vaikutusaika ja laajempi vaikutusalue ovat, sitä suurempia aaltoja muodostuu (Amir ja muut, 2016).

Tuulen synnyttämien aaltojen lisäksi veden liikettä voivat aiheuttaa myös muut luonnonilmiöt, kuten myrskyt, maanjäristykset ja vuorovesi-ilmiö (NOAA, 2024). Aaltoenergian kannalta merkittäviä ovat erityisesti paisunta-aallot, jotka ovat irronneet alkuperäisestä tuulen vaikutusalueesta ja voivat kulkea pitkiä matkoja pienillä energiahäviöillä (Ilmatieteenlaitos, 2021). Paisunta-aallot sisältävät suuren määrän energiaa ja ovat usein tasaisempia sekä vakaampia kuin paikalliset tuuliaallot (Zheng ja muut, 2022).

Aallon eteneminen siirtää energiaa veden pinnalla, mutta vesi ei varsinaisesti etene aaltojen mukana. Veden hiukkaset liikkuvat pääosin värähdellen tasapainoasemansa ympärillä lähes ympyränmuotoisilla radoilla (Amir ja muut, 2016). Hiukkasten liikkeen amplitudi pienenee syvyyden kasvaessa, minkä vuoksi aaltojen vaikutus heikkenee syvemmissä vedessä.

3 Nykyiset teknologiat

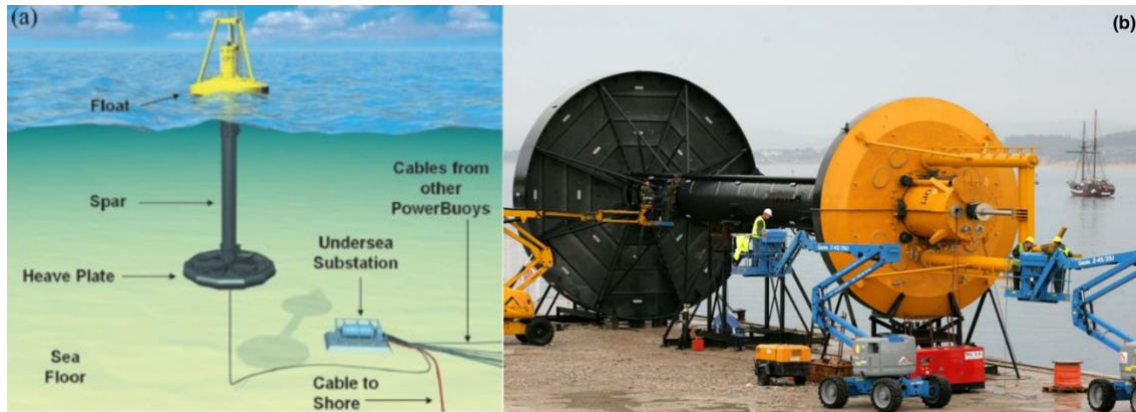
3.1 Pisteabsorboijat

Pisteabsorboija (point absorber) on yksi yleisistä aaltoenergiaa hyödyntävistä laitteista. Se on pystysuunnassa liikkuva kelluva rakenne, joka muuntaa aaltojen aiheuttamaa suhteellista liikettä sähköenergiaksi. Laitteessa on tyypillisesti kelluva osa sekä ankkuroitu tai referenssipisteenä toimiva alaosa, kuten kuvassa 1a esitetään. Aaltojen liike aiheuttaa näiden osien välille suhteellisen liikkeen, joka muunnetaan sähköenergiaksi erilaisten energianmuunnosjärjestelmien avulla (Amir ja muut, 2016).

Käytössä olevia muunnostekniikoita ovat:

- Hydraulinen järjestelmä: kelluvan osan liike käyttää mäntää, joka puristaa nestettä ja pyörittää turbiinia tai generaattoria.
- Sähkömekaaninen järjestelmä: mekaaninen liike muunnetaan suoraan sähköksi esimerkiksi lineaarigeneraattorin avulla.
- Pneumaattinen järjestelmä: liike puristaa ilmaa, joka ohjataan turbiinin läpi sähköntuotantoa varten.

Tuotettu sähköenergia siirretään merikaapeleilla rannalle tai sähköverkkoon liitettävään infrastruktuuriin (Amir ja muut, 2016). Pisteabsorboijateknologiaa hyödyntävä PowerBuoy koostuu kelluvasta yläosasta ja vedenalaisesta rungosta, joiden välinen pystysuuntainen liike muunnetaan sähköenergiaksi hydraulisen energianmuunnon avulla, kuten kuvissa 1a ja 1b esitetään (Falcão, 2010).

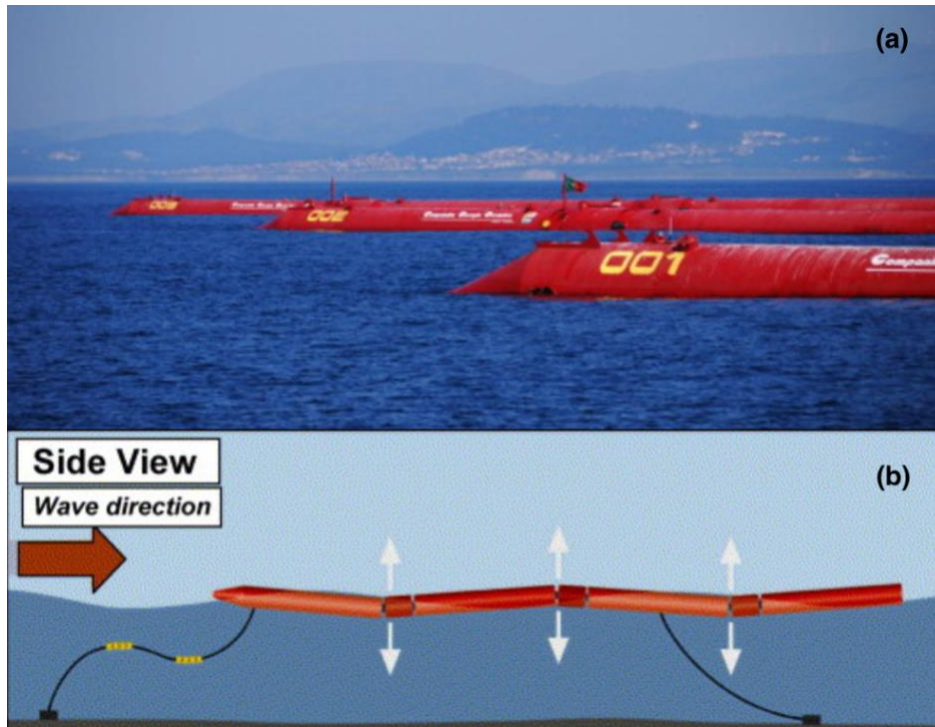


Kuva 1. (a) Pisteabsorboijaan perustuva aaltoenergiamuunnin, jossa aallokon pystysuuntainen liike muunnetaan sähköenergiaksi, (b) PowerBuoy-aaltoenergiamuunnin (Zheng ja muut, 2020; Falcão, 2010).

3.2 Vaimentavat laitteet

Vaimentavat aaltoenergialaitteet (attenuator) ovat pitkiä kelluvia nivelöityjä rakenteita, jotka asettuvat aallon etenemissuunnan mukaisesti. Ne hyödyntävät aaltojen synnyttämää taivutusliikettä nivelissä sähköenergian tuottamiseen. Yksi tunnetuimmista vaimentavista aaltoenergialaitteista on Pelamis Wave Energy Converter (Kuva 2a; Zheng, 2022).

Laitteen kelluvat osat ovat yhdistetty toisiinsa nivelillä. Nivelkohtiin sijoitetut hydrauliset sylinterit muuntavat rakenteen taipumisliikkeen hydrauliseksi paineeksi. Aaltojen taivuttaessa rakennetta sylinterit pumppaavat öljyä korkeapaineiseen hydraulipiiriin, josta paine johdetaan hydraulimoottoriin. Hydraulimoottori pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä (Kuva 2b; Zheng, 2022). Koska rakenne taipuu useissa nivelkohdissa samanaikaisesti, se voi hyödyntää useiden aaltojen aiheuttamaa liikettä rakenteen eri osissa, mikä tekee energian talteenotosta tehokasta (Henderson, 2006).

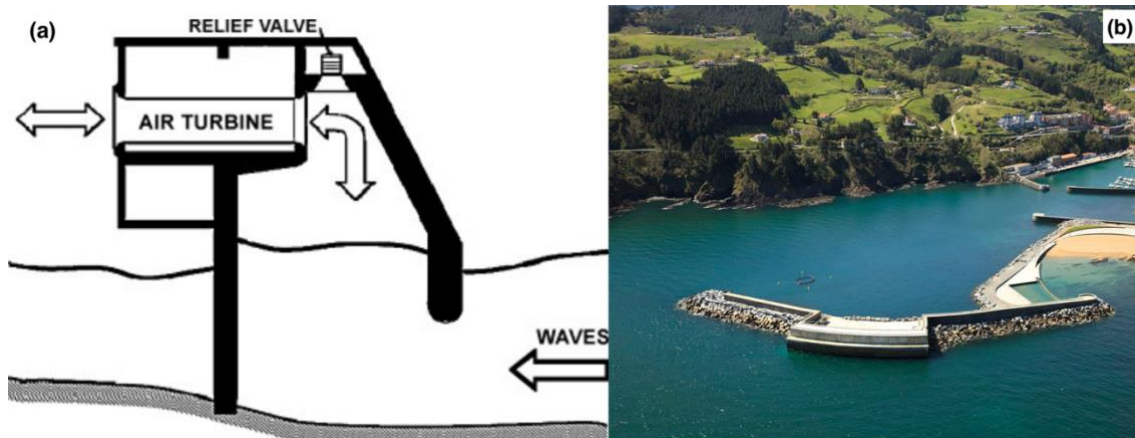


Kuva 2. (a) Pelamis Wave Energy Converter -aaltovoimapuisto, (b) nivelöidyn rakenteen toimintaperiaate. (Falcão, 2010; Henderson, 2006).

3.3 Ilmakammiojärjestelmät

Oscillating Water Column (OWC) on yksi varhaisimmista ja eniten tutkituista aaltoenergiateknologioista. Teknologia perustuu ilmakammioon, jossa aallokon aiheuttama vedenpinnan nousu ja lasku synnyttävät ilman virtauksen kammion yläosassa. Ilmavirtaus ohjataan turbiinin läpi, joka muuntaa ilman liike-energian sähköenergiaksi (Kuva 3a).

OWC-järjestelmiä voidaan sijoittaa esimerkiksi rannikkorakenteisiin tai kelluville alustoille. Teknologian etuina pidetään suhteellisen yksinkertaista rakennetta sekä sitä, että sähköntuotantolaitteisto voidaan sijoittaa osittain vedenpinnan yläpuolelle, mikä helpottaa kunnossapitoa. Yksi tunnetuimmista OWC-teknologiaan perustuvista järjestelmistä on Espanjan pohjoisrannikolla sijaitseva Mutrikun aaltoenergiailaitos (Kuva 3b; Rosati ja muut, 2022).

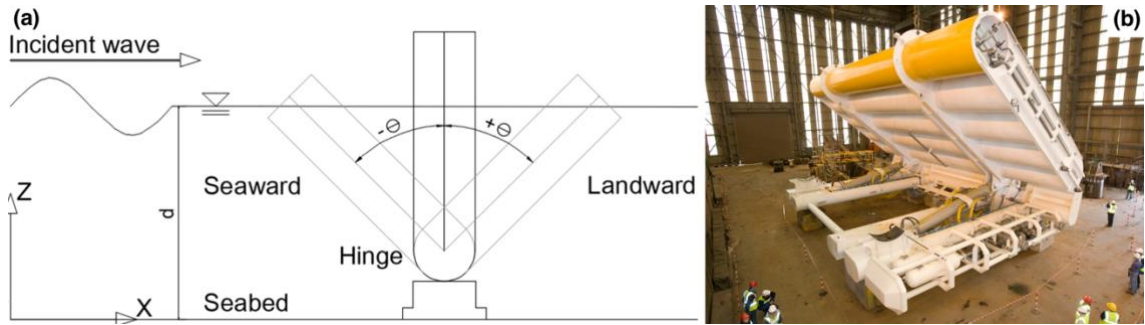


Kuva 3. (a) Oscillating Water Column -ilmakammiojärjestelmä, jossa aallokon aiheuttama vedenpinnan värähtely synnyttää ilmvirran turbiinin läpi sähköntuotantoa varten, (b) Mutrikun OWC-aaltoenergiailaitos (Falcão, 2010; Rosati ja muut, 2022).

3.4 Vaakaliikkeeseen perustuvat järjestelmät

Oscillating Surge Converter (OSC) on aaltoenergiateknologia, joka hyödyntää aallon vaakasuuntaista eli edestakaista liikettä. Se on yleensä nivelletty läppämäinen rakenne, joka asennetaan matalaan veteen merenpohjan läheisyyteen. Aaltojen aiheuttama veden edestakainen liike saa läpän heilahtelemaan, jolloin liike voidaan muuntaa sähköenergiaksi erilaisten energianmuunnosjärjestelmien avulla (Folley ja muut, 2004).

OSC-järjestelmissä yleisimmin käytetty energianmuunnosratkaisu on hydraulinen järjestelmä, jossa läpän liike muunnetaan paineistetun nesteen avulla sähköenergiaksi. Ratkaisu mahdollistaa epäsäännöllisen aaltoliikkeen tehokkaan hyödyntämisen, mutta lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja huoltotarvetta (Falcão, 2010). Oyster-aaltoenergiamuunnin on yksi tunnetuimmista OSC-teknologiaan perustuvista järjestelmistä (Kuva 4b; Falcão, 2010).



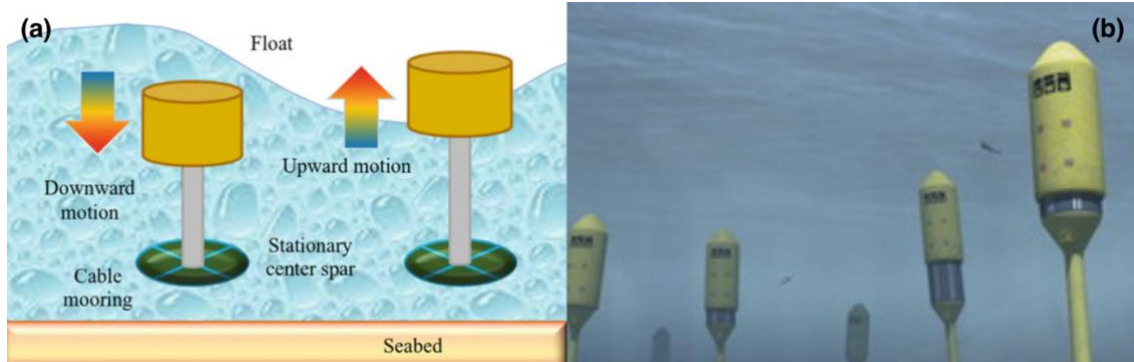
Kuva 4. (a) Oscillating Surge Wave Converter -aaltoenergiamuunnin, joka hyödyntää aallokon vaakasuuntaista liikettä, (b) Oyster-aaltoenergiamuunnin (Benites-Munoz ja muut, 2020; Marine Energy Research, City University of Hong Kong, n.d.).

3.5 Upotetut paine-erojärjestelmät

Upotetut paine-erojärjestelmät ovat aaltoenergiateknologiaa, jossa veden alle sijoitettu rakenne hyödyntää aaltojen synnyttämiä paine-eroja energiantuotantoon. Järjestelmä koostuu tyypillisesti merenpohjan läheisyyteen sijoitetusta levystä tai muusta vedenalaisesta rakenteesta, jonka liike muunnetaan sähköenergiaksi energian talteenottojärjestelmän (PTO) avulla.

Aaltojen synnyttämä kineettinen ja potentiaalinen energia siirtyy rakenteen ja PTO-järjestelmän kautta sähköenergiaksi. Rakenteen liike voi tapahtua useassa suunnassa riippuen käytetystä energianmuunnosratkaisusta (Kuva 5a; Tom ja muut, 2019).

Archimedes Waveswing on yksi tunnetuimmista upotettuun paine-eroon perustuvista aaltoenergiamuuntimista (Kuva 5b).



Kuva 5. (a) Upotettuun paine-eroon perustuva aaltoenergiamuunnin, jossa aallokon aiheuttamat vedenpaineen vaihtelut liikuttavat vedenalaista rakennetta, (b) Archimedes Waveswing -aaltoenergiamuunnin (Farrok ja muut, 2024; Miller, 2013).

3.6 Hybridijärjestelmät

Hybridijärjestelmissä aaltoenergia yhdistetään muiden uusiutuvien energialähteiden, kuten merituulivoiman, kanssa samalle alustalle tai samaan sijaintiin. Tavoitteena on kasvattaa energiantuotantoa sekä hyödyntää yhteistä infrastruktuuria, kuten sähköverkkoliityntöjä, huoltojärjestelmiä ja merellisiä rakenteita.

Aalto- ja tuulivoiman yhdistäminen voi tasoittaa energiantuotannon vaihtelua ja pienentää nollatuotannon jaksoja, mikä voi parantaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta ja taloudellista kannattavuutta (Neshat ja muut, 2024). Yksi tunnetuimmista hybridiratkaisuista on Poseidon-järjestelmä, jossa aaltoenergiamuuntimet ja kelluvat merituuliturbiinit toimivat samalla kelluvalla alustalla (Kuva 6; McTiernan ja muut, 2020).



Kuva 6. Poseidon-hybridijärjestelmä, jossa yhdistyvät tuuliturbiinit sekä oskilloivaan runkoliikkeeseen ja OWC-teknoologiaan perustuvat aaltoenergiamuuntimet (McTiernan ja muut (2020)).

4 Aaltoenergian taloudellinen kannattavuus

Tässä luvussa tarkastellaan aaltoenergian taloudellista kannattavuutta LCOE-mittarin avulla. LCOE kuvaa energiantuotannon keskimääräistä yksikkökustannusta koko järjestelmän elinkaaren aikana ja mahdollistaa eri energiantuotantomuotojen taloudellisen vertailun. Lisäksi tarkastellaan keskeisiä teknisiä, taloudellisia ja operatiivisia tekijöitä, jotka vaikuttavat aaltoenergian tuotantokustannuksiin ja niiden mahdolliseen alentamiseen tulevaisuudessa.

4.1 LCOE-mittari

Aaltoenergian taloudellista kannattavuutta voidaan tarkastella LCOE-mittarilla. LCOE kuvaa sähköntuotannon keskimääräistä kustannusta tuotettua energiayksikköä kohden koko voimalaitoksen elinkaaren aikana. Mittari ilmaisee sähkön minimimyyntihinnan, jolla hankkeen kustannukset katetaan. Siinä yhdistyvät investointi- ja käyttökustannukset sekä tuotetun energian yhdeksi vertailukelpoiseksi arvoksi (€/MWh), minkä avulla voidaan vertailla eri energiantuotantomuotojen taloudellista kilpailukykyä yhteisellä mittarilla (Open Energy Information, 2023).

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}, \quad (1)$$

missä

I_0 = investointimenot (EUR)

A_t = vuosittaiset kustannukset (EUR)

E_t = vuosittainen sähköntuotanto (MWh)

i = diskonttokorko, joka kuvaa rahan aika-arvoa (%)

t = tarkastelujakson vuosi (a)

n = järjestelmän elinikä (a)

Aaltoenergian tuotantokustannukset (LCOE) ovat laskeneet viime vuosina, vaikka ne ovat edelleen selvästi korkeita verrattuna vakiintuneisiin energiamuotoihin. Vuonna 2015 kustannukset olivat noin 470–1400 €/MWh, ja vuoteen 2020 mennessä tuotantokustannukset olivat laskeneet noin 280–520 €/MWh tasolle (IRENA, 2020). Kustannusten lasku on seurausta erityisesti teknologian kehityksestä, demonstraatioprojektien lisääntymisestä sekä energiamuunnosjärjestelmien parantumisesta (IRENA, 2020; Booz Allen Hamilton, 2025).

Teknologian edelleen kypsyessä ja tuotannon skaalautuessa kustannusten arvioidaan laskevan tulevaisuudessa merkittävästi. IRENA:n (2024) arvioiden mukaan LCOE voi laskea noin 200 €/MWh tasolle ja pitkällä aikavälillä jopa noin 100 €/MWh tasolle. Tästä huolimatta aaltoenergia on edelleen selvästi kalliimpaa kuin useimmat muut uusiutuvat energialähteet. Vertailun vuoksi maa-tuulivoiman LCOE on noin 30 €/MWh, aurinkosähkön noin 40 €/MWh, ja merituulivoimalan noin 70 €/MWh (IRENA, 2024).

LCOE-arvoon vaikuttavat useat tekniset, taloudelliset ja operatiiviset tekijät. Erityisesti investointi- ja käyttökustannukset, energiantuotannon määrä, teknologian kehitys sekä mahdollisuudet hyödyntää mittakaavaetuja ja yhteistä infrastruktuuria vaikuttavat aaltoenergian tuotantokustannuksiin (Booz Allen Hamilton, 2025).

4.2 Investointi- ja käyttökustannukset

Aaltoenergian korkeaan energiantuotannon yksikkökustannukseen vaikuttavat erityisesti suuret investointi- ja käyttökustannukset. Merkittävä osa kustannuksista muodostuu aaltoenergialaitteiden rakenteista, ankkuroinnista, meriasennuksista sekä sähköverkkoliitynnöistä. Merellinen ympäristö asettaa rakenteille vaativia teknisiä vaatimuksia, sillä niiden on kestävä jatkuvaa aaltojen aiheuttamaa kuormitusta, suuria dynaamisia voimia sekä äärimmäisiä sääolosuhteita. Tämä lisää materiaalikustannuksia, rakenteiden monimutkaisuutta sekä asennus- ja huoltotoimenpiteiden vaativuutta (Booz Allen Hamilton, 2025).

Fyysinen rakenne muodostaa yhden aaltoenergiamuuntimien suurimmista kustannuseristä. Rakenteiden tulee kestää sekä aaltojen aiheuttamaa syklittäistä painekuormitusta että ankkurointijärjestelmien synnyttämiä vetojännityksiä kiinnityspisteissä. Erityisesti voimakkaiden myrskyolosuhteiden aikana rakenteisiin kohdistuu nopeasti vaihtelevia kuormituksia, jotka voivat aiheuttaa merkittäviä rasituksia laitteen rakenteille. Tämän vuoksi rakenteiden suunnittelussa korostuvat lujuus, materiaalivalinnat sekä turvallisuusmarginaalit, mikä kasvattaa investointikustannuksia (Booz Allen Hamilton, 2025).

Käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat merellisissä olosuhteissa usein korkeita verrattuna maa-alueilla sijaitseviin energiantuotantojärjestelmiin. Huoltotoimenpiteet edellyttävät erikoisaluksia ja sopivia sääolosuhteita, minkä vuoksi huoltojen toteuttaminen voi olla hidasta ja kallista. Lisäksi käyttökatkokset heikentävät laitosten käytettävyyttä ja pienentävät energiantuotantoa, mikä nostaa energiantuotannon yksikkökustannusta edelleen (Booz Allen Hamilton, 2025).

4.3 Energiantuotanto ja kapasiteettikerroin

Energiantuotannon määrä vaikuttaa suoraan aaltoenergian energiantuotannon yksikkökustannukseen. Mitä enemmän sähköenergiaa järjestelmä pystyy tuottamaan suhteessa investointi- ja käyttökustannuksiin, sitä pienemmäksi LCOE-arvo muodostuu. Energiantuotantoon vaikuttavat erityisesti paikalliset aalto-olosuhteet, laitteen hyötysuhde, energianmuunnosjärjestelmä sekä laitoksen käytettävyyks (Ocean Energy Systems, 2015).

Aaltoenergiajärjestelmien energiantuotannon tehokkuutta voidaan kuvata kapasiteettikertoimella, joka ilmaisee toteutuneen energiantuotannon suhteen laitoksen teoreettiseen maksimituotantoon. Korkea kapasiteettikerroin tarkoittaa, että järjestelmä pystyy hyödyntämään aaltoenergiaa tehokkaasti ja tuottamaan enemmän

sähköenergiaa, mikä alentaa energiantuotannon yksikkökustannusta (Ocean Energy Systems, 2015).

Kapasiteettikerroin riippuu merkittävästi paikallisista aalto-olosuhteista. Suuren aaltoenergiaresurssin alueilla aaltoenergiajärjestelmät voivat saavuttaa noin 30–40 % kapasiteettikertoimia, kun taas keskinkertaisilla aaltoalueilla kapasiteettikertoimet ovat tyypillisesti noin 25–35 % (Ocean Energy Systems, 2015). Suurempi energiantuotanto ei kuitenkaan automaattisesti tarkoita pienintä mahdollista LCOE-arvoa, sillä korkeamman energiantuotannon saavuttaminen voi edellyttää rakenteellisesti suurempia ja kalliimpia laitteita. Taloudellisesti optimaalinen ratkaisu muodostuu energiantuotannon ja kustannusten välisestä tasapainosta (Ocean Energy Systems, 2015).

Energiantuotantoon vaikuttaa myös laitoksen käytettävyys, jolla tarkoitetaan sitä, kuinka suuren osan ajasta järjestelmä on toimintakunnossa ja kykenee tuottamaan sähköenergiaa. Varhaisessa kehitysvaiheessa aaltoenergiajärjestelmien käytettävyys voi jäädä noin 80 % tasolle teknologisten ongelmien ja käyttökatkosten vuoksi. Teknologian sekä kunnossapitostrategioiden kehittyessä käytettävyyden arvioidaan kuitenkin kasvavan yli 95 % tasolle, mikä parantaa vuosittaista energiantuotantoa (Ocean Energy Systems, 2015).

4.4 Teknologian kypsyys ja mittakaavaedut

Aaltoenergiateknologia on edelleen suhteellisen varhaisessa kehitysvaiheessa, eikä alalla ole vielä saavutettu yhtä selkeää teknologista ratkaisua. Kehitteillä on useita erilaisia aaltoenergiamuunninkonsepteja, jotka ovat eri teknologisen valmiustason vaiheissa. Tämä aiheuttaa suurta vaihtelua kustannus-, suorituskyky- ja luotettavuusarvioissa (Ocean Energy Systems, 2015).

Teknologian varhaisessa kehitysvaiheessa investointikustannukset ovat yleensä korkeita, sillä laitteita valmistetaan pieninä määrinä eikä laajamittaista tuotantoa tai vakiintuneita

valmistusprosesseja ole vielä saavutettu. Lisäksi osa kustannus- ja suorituskykytiedoista perustuu simulaatioihin tai arvioihin ilman täyden mittakaavan käyttökokemusta, mikä lisää epävarmuuksia teknologian taloudelliseen arviointiin (Ocean Energy Systems, 2015).

Teknologian kehittymisen ja tuotannon kasvun arvioidaan alentavan aaltoenergian kustannuksia merkittävästi tulevaisuudessa. Oppimiskäyrillä tarkoitetaan ilmiötä, jossa teknologian kustannukset alenevat käyttökokemuksen, teknologisen kehityksen ja tuotantomäärien kasvun seurauksena. Oppimiskäyrien perusteella kustannusten odotetaan laskevan teknologisten innovaatioiden sekä mittakaavaetujen seurauksena. Massatuotanto, standardoidut komponentit sekä tehokkaammat kunnossapitostrategiat voivat pienentää investointi- ja käyttökustannuksia huomattavasti (Ocean Energy Systems, 2015).

4.5 Hybridijärjestelmät ja kustannusten alentaminen

Hybridijärjestelmissä aaltoenergia yhdistetään esimerkiksi merituulivoimaan yhteiselle kelluvalle alustalle. Yhteinen infrastruktuuri mahdollistaa sähköverkkoliityntöjen, huoltojärjestelmien sekä merellisten rakenteiden yhteiskäytön, mikä voi alentaa sekä investointi- että käyttökustannuksia verrattuna erillisiin järjestelmiin (McTiernan & Sharman, 2020).

Hybridijärjestelmien tavoitteena on optimoida energiantuotanto hyödyntämällä samassa sijainnissa sekä tuuli- että aaltoenergiaa. Yhdistämällä useita energialähteitä voidaan kasvattaa tuotettua energiamäärää suhteessa infrastruktuurikustannuksiin, mikä voi alentaa energiantuotannon yksikkökustannusta. Lisäksi aalto- ja tuulivoima voivat täydentää toisiaan energiantuotannossa. Aaltoenergia voi tasoittaa tuulivoiman tuotannon vaihtelua erityisesti vähätuulisina ajanjaksoina, mikä voi parantaa energiantuotannon ennustettavuutta ja järjestelmän kokonaistehokkuutta (McTiernan & Sharman, 2020).

5 Tulokset ja pohdinta

Tarkastelun perusteella aaltoenergian korkea LCOE-arvo johtuu erityisesti suurista investointi- ja käyttökustannuksista sekä teknologian varhaisesta kehitysvaiheesta. Merelliset olosuhteet asettavat suuria vaatimuksia rakenteille, ankkuroinnille, sähköverkkoliitynnöille sekä kunnossapidolle, mikä nostaa järjestelmien kokonaiskustannuksia.

Taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös energiantuotannon määrä. Kapasiteettikerroin, käytettävyys sekä paikalliset aalto-olosuhteet vaikuttavat siihen, kuinka paljon energiaa järjestelmällä voidaan tuottaa suhteessa sen elinkaarikustannuksiin. Suurempi energiantuotanto alentaa energiantuotannon yksikkökustannusta ja parantaa järjestelmän kilpailukykyä.

Teknologian kypsyminen ja mittakaavaetujen saavuttaminen voivat alentaa aaltoenergian kustannuksia tulevaisuudessa. Oppimiskäyrien perusteella käyttökokemuksen lisääntyminen, tuotannon skaalautuminen sekä teknologiset innovaatiot voivat pienentää investointi- ja käyttökustannuksia merkittävästi.

Lisäksi hybridijärjestelmät voivat parantaa aaltoenergian taloudellista kannattavuutta yhteisen infrastruktuurin ja tasaisemman energiantuotannon avulla. Yhteiset sähköverkkoliitynnät, huoltojärjestelmät ja merelliset rakenteet voivat pienentää kustannuksia suhteessa tuotettuun energiaan.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella aaltoenergia tarjoaa merkittävää potentiaalia uusiutuvana energianlähteenä, mutta sen taloudellinen kilpailukyky on edelleen selvästi heikompi verrattuna vakiintuneisiin uusiutuviin energiamuotoihin. Aaltoenergian keskeisiä vahvuuksia ovat korkea energiatiheys, hyvä ennustettavuus, laaja esiintyvyys merialueilla sekä vähäinen maa-alan tarve.

Aaltoenergian korkeat tuotantokustannukset johtuvat erityisesti suurista investointi- ja käyttökustannuksista sekä teknologian varhaisesta kehitysvaiheesta. Lisäksi energiantuotannon määrä, kapasiteettikerroin sekä järjestelmien käytettävyys vaikuttavat merkittävästi energiantuotannon yksikkökustannukseen.

Tutkimuksen perusteella aaltoenergian kustannusten arvioidaan kuitenkin laskevan tulevaisuudessa teknologian edistymisen, käyttökokemuksen lisääntymisen sekä mittakaavaetujen kehittymisen seurauksena. Hybridijärjestelmät voivat lisäksi parantaa aaltoenergian taloudellista kannattavuutta yhteisen infrastruktuurin ja tasaisemman energiantuotannon avulla.

Aaltoenergian laajempi käyttöönotto edellyttää kuitenkin edelleen teknologian kehitystä, demonstraatiohankkeita sekä tutkimus- ja kehitystoimintaa. Pitkällä aikavälillä aaltoenergia voi muodostaa merkittävän osan uusiutuvan energian tuotantojärjestelmää erityisesti alueilla, joilla aaltoenergiaresurssit ovat suotuisat.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin aaltoenergiateknologioita sekä aaltoenergian taloudellista kannattavuutta energiantuotannon yksikkökustannuksen näkökulmasta. Työn tavoitteena oli esitellä keskeisiä aaltoenergiamuuntimia sekä tarkastella tekijöitä, jotka vaikuttavat aaltoenergian tuotantokustannuksiin. Tutkielma toteutettiin kirjallisuustarkasteluna hyödyntäen erityisesti yksikkökustannusta kuvaavaa LCOE-mittaria. Lisäksi tarkasteltiin energiantuotannon, kapasiteettikertoimen, käytettävyyden ja hybridijärjestelmien vaikutusta aaltoenergian taloudelliseen kannattavuuteen.

Tarkastelun perusteella aaltoenergian vahvuuksia ovat korkea energiatiheys, hyvä ennustettavuus sekä laaja esiintyvyys merialueilla. Taloudellista kilpailukykyä heikentävät kuitenkin edelleen korkeat investointi- ja käyttökustannukset sekä teknologian varhainen kehitysvaihe. Teknologian kehittymisen, käyttökokemuksen lisääntymisen ja mittakaavaetujen arvioidaan kuitenkin alentavan kustannuksia tulevaisuudessa ja parantavan aaltoenergian kilpailukykyä suhteessa muihin uusiutuviin energialähteisiin.

Lähteet

- Amir, M., Sharip, R. & Muzanni, M. (2016). Wave energy convertors (WEC): A review of the technology and power generation. *AIP Conference Proceedings*, 1775, 030100. <https://doi.org/10.1063/1.4965220>
- Booz Allen Hamilton. (2025). Wave and tidal energy cost reduction and performance Improvement opportunities. https://mhkdr.openei.org/files/660/Marine%20Energy%20Cost%20Performance%20FINAL%20Report_May27.2025%20%28002%29.pdf
- Benites-Munoz, D., Huang, L., Anderlini, E., Marín-Lopez, J. R. & Thomas, G. (2020). Hydrodynamic modelling of an oscillating wave surge converter including power take-off. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 771. <https://doi.org/10.3390/jmse8100771>
- Falcão, A. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Farrok, O., Farah, M. & Islam M. R. (2024). *Introduction to the Principles of Wave Energy Conversion*. Teoksessa Farrok, O. & Islam M. R. (toim.). *Oceanic Wave Energy Conversion* (s. 1–15). Springer Nature.
- Folley, M., Whittaker, T. & Osterried, M. (2004). The Oscillating wave surge converter. *Proceedings of the 14th International Conference on Ocean and Polar Engineering (ISOPE 2004)*, Toulon, France. Noudettu 26.04.2026 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/266404049_The_Oscillating_Wave_Surge_Converter
- Henderson, R. (2006). Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy*, 31, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.021>
- Ilmatieteenlaitos. (2021). *The life cycle of wind-induced waves*. Noudettu 24.04.2026 osoitteesta <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/wind-induced-waves>

- IRENA. (2020). *Innovation outlook: Ocean energy technologies*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf
- IRENA. (2024). *Power generation costs in 2024*. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Alegría, I. & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 413–434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Marine Energy Research. (n.d.). *Wave Energy - Devices*. Noudettu 07.05.2026 osoitteesta https://www.cityu.edu.hk/see_mer/wave-devices.htm
- McTiernan, K. L. & Sharman, K. (2020). Review of hybrid offshore wind and wave energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 1452(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1452/1/012016>
- Miller, R. (2013). *Development of a proposal for a technology assessment report*. University of Edinburgh. Noudettu 07.05.2026 osoitteesta <https://rosspmiller.weebly.com/wave-devices.html>
- Neshat, M., Sergiienko, N., Neshad, M., Silva, L., Amini, E., Marsooli, R., Garcia, D. & Mirjalili, S. (2024). Enhancing the performance of hybrid wave-wind energy systems through a fast and adaptive chaotic multi-objective swarm optimisation method. *Applied Energy*, 362, 122955. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122955>
- NOAA. (2024, 16. kesäkuuta). *Why does the ocean have waves?* Noudettu 25.04.2026 osoitteesta <https://oceanservice.noaa.gov/facts/wavesinocean.html>
- Ocean Energy Systems. (2015). *International levelised cost of energy for ocean energy technologies*. Noudettu 08.05.2026 osoitteesta <https://www.ocean-energy-systems.org/publications/oes-documents/market-policy-/document/international-levelised-cost-of-energy-for-ocean-energy-technologies-2015-/>

- Ocean Energy Systems. (2023). *What is ocean energy?* Noudettu 26.04.2026 osoitteesta <https://www.ocean-energy-systems.org/ocean-energy/what-is-ocean-energy/waves/>
- Open Energy Information. (2023, 18. tammikuuta). *Levelized cost of energy*. Noudettu 22.04.2026 osoitteesta [https://openei.org/wiki/PRIMRE/Telesto/Metrics/Levelized Cost of Energy](https://openei.org/wiki/PRIMRE/Telesto/Metrics/Levelized_Cost_of_Energy)
- Rosati, M., Henriques, J. & Ringwood, J. (2022). Oscillating-water-column wave energy converters: A critical review of numerical modelling and control. *Energy Conversion and Management*: X, 16, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100322>
- Tom, N., Yu, Y. & Wright, A. (2019). *Submerged pressure differential plate*. In *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2019)*, Napoli, Italy. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Noudettu 22.04.2026 osoitteesta <https://docs.nrel.gov/docs/fy20osti/73490.pdf>
- USGS. (2019). *How much water is there on Earth?* Noudettu 24.04.2026 osoitteesta <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/how-much-water-there-earth>
- Vitale, O., McCabe, R., Brundan, A., Mandalam, Y., Munera, A. & Haji, M. (2026). Design, build, and analysis of small-scale wave energy converter prototypes. *Journal of Mechanical Design*, 148, 091701-1. <https://doi.org/10.1115/1.4070757>
- Zheng, C., Wu, D., Wu, H., Guo, J., Shen, C., Tian, C., Tian, X., Xiao, Z., Zhou, W., Li, C. (2016). Propagation and attenuation of swell energy in the Pacific Ocean. *Renewable Energy*, 188, 750–764. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.071>
- Zheng, S., Zhang, Y. & Iglesias, G. (2020). Concept and performance of a novel wave energy converter: Variable Aperture Point-Absorber (VAPA). *Renewable Energy*, 153, 681–700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.134>
- Zheng, S. (2022). Attenuator wave energy converters. *Modelling and optimisation of wave energy converters*, 201–232. <https://doi.org/10.1201/9781003198956-6>