Tampereen yliopisto

Oskari Backman

ENERGIANVARASTOINTIMUOTOJEN VERTAILU SÄHKÖN VAIHTELEVAN TUOTANNON JA KULUTUKSEN TUEKSI

Kandidaatintyö
Johtamisen ja talouden tiedekunta
Tarkastaja: Jussi Valta
Joulukuu 2024

TIIVISTELMÄ

Oskari Backman: Energianvarastointimuotojen vertailu sähkön vaihtelevan tuotannon ja kulutuksen tueksi (Comparison of energy storage methods to support variable electricity production and consumption)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tuotantotalous
Joulukuu 2024

Uusiutuvan energian jatkuva lisääntyminen kasvattaa sähkön tuotannon epävarmuutta. Sähkö on hyödykkeenä erityisessä asemassa, sillä sen tuotannon ja kulutuksen tulee aina olla tasapainossa. Ennen säästä riippuvien uusiutuvien energianlähteiden yleistymistä tätä tasapainoa hallittiin säätämällä kulutusta tai tuotantoa tasapainon saavuttamiseksi. Uusiutuvan energian yleistyessä energian tuotannon vaihtelut kasvavat kuitenkin niin suuriksi, ettei kulutuksen ja tuotannon säätö ole enää järkevästi toteutettavissa. Energiavarastoilla pyritään vastaamaan tähän ongelmaan varastoimalla energiaa ylituotannon aikana ja purkamalla niistä energiaa, kun muu tuotanto on vähäistä. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä energianvarastointiteknologioihin, niiden vertailuun ja lopulta soveltamiseen Suomen toimintaympäristössä.

Tämä työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja se perustuu Scopus-tietokannasta kerättyihin artikkeleihin, sekä relevantteihin tilastoihin. Tilastojen avulla selvitettiin Suomen sähköjärjestelmän nykytilaa sekä perusteltiin tarve energianvarastoinnille. Tilastojen ja artikkeleiden pohjalta rakennettiin ymmärrys energianvarastoinnin nykytilaan ja käytössä oleviin teknologioihin. Kirjallisuuden ja tilastojen pohjalta valittiin kolme teknologiaa, joita voidaan mahdollisesti hyödyntää Suomen sähköjärjestelmän tukena. Nämä teknologiat olivat pumpattu vesivoima, litiumioniakut sekä vetyvarastot. Artikkeleiden avulla löydettiin avaintekijöitä, joiden avulla energiavarastoja voidaan vertailla. Nämä tekijät jakautuivat teknisiin (vasteaika, teho ja purkautumisaika), taloudellisiin (elinkaarikustannukset ja tasoitetut varastointikustannukset) sekä teknologioille ominaisiin riskeihin ja haasteisiin. Tekniset tekijät määrittelevät, millä sähkömarkkinoiden osa-alueilla kukin teknologia voi toimia sekä minkä kokoluokan laitoksiin teknologiaa voidaan hyödyntää. Taloudelliset tekijät kertovat teknologian kustannusten nykytilaa ja pyrkivät ennustamaan kustannuksia tulevaisuudessa. Haasteiden ja riskien tunnistamiseksi hyödynnettiin muokattua PESTEL-analyysiä, jotta saatiin suoritettua kattava analyysi teknologioiden suurimmista yhteiskunnallisista haasteista ja riskeistä. Tulososiossa teknologioita verrataan määritettyjen tekijöiden avulla ja näiden tulosten perusteella päätelmät osiossa pohditaan teknologioiden kelpoisuutta Suomen sähköjärjestelmään.

Työn päähavaintoihin kuuluu se, ettei yhdellä energianvarastointiratkaisulla voida ratkaista jokaista sähköverkon ongelmaa. Litiumioniakut soveltuvat todella monipuolisesti lyhyen ja keskipitkän tarpeen energianvarastointiin. Litiumioniakkujen kustannukset ovat korkeat, mutta ne laskevat jatkuvasti. Niillä on myös todettuja turvallisuusriskejä liittyen akkujen palamiseen. Vetyvarastot ovat utopistinen vihreä ratkaisu energian varastointiin, mutta todellisuudessa ne ovat kustannustehokas vain pitkäaikaiseen energianvarastointiin. Niiden implementointia on ajettu poliittisesti jo pitkään, mutta tulokset ovat heikkoja. Pumpattu vesivoima on tämän hetken hallitseva energianvarastointiratkaisu. Sen suosio on kuitenkin jatkuvasti laskussa, sillä se ei ole kokenut merkittävää kehitystä teknisesti tai taloudellisesti. Tämän työn perusteella vety soveltuu siis pitkän aikavälin ja litiumioniakut lyhyen sekä keskipitkän aikavälin energianvarastointiin. Tutkimuksen tulokset tarjoavat organisaatioille yksinkertaisen katsauksen energiavarastojen vertailuun. Työn tulokset eivät kuitenkaan ole täysin aukottomia, sillä työssä ei huomioida kaikkia energianvarastointiteknologioita eikä varastointiteknologioiden yhdistelmiä, niin kutsuttuja hybridiratkaisuja.

Avainsanat: energianvarastointi, uusituvat energianlähteet, pumpattu vesivoima, vetyvarastot, litiumioniakut, elinkaarikustannukset, tasoitetut varastointikustannukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on laadittu Tampereen yliopiston tekniikan alan Tuotantotalouden opinnäytetyönä. Kandidaatintyön aihe perustui mielenkiintoon muuttuvaa sähköjärjestelmää kohtaan ja siihen, mitä lieveilmiöitä muutoksella on. Aiheeseen perehtyminen auttoi minua kehittämään kriittistä ajattelukykyäni sekä tieteellisen tutkimuksen tekemiseen vaadittavia taitoja.

Kiitän Jussi Valtaa sekä Jaakko Siltaloppia rakentavasta palautteesta, Jussi Valtaa avusta aiheen rajauksen ja työn kehityksen kanssa sekä työni opponoija arvokkaista kehitysideoista. Suuri kiitos myös perheelleni ja ystävilleni tuesta ja kehittävistä keskusteluista kandidaatintyön aikana

Tampereella, 8.12.2024

Oskari Backman

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1 Työn tausta 1
1.2 Tutkimuksen tavoite 2
1.3 Tutkimusmetodologia ja -aineisto 2
1.4 Työn rakenne 4
2. ENERGIAVARASTOJEN MERKITYS SUOMESSA 5
2.1 Uusiutuvan energian tuotannon ja kulutuksen vaihtelu sekä energian varastointitarve 5
2.2 Sähkömarkkinat 6
3. ENERGIANVARASTOINTIMUODOT 9
3.1 Energianvarastointimuotojen valinta 9
3.2 Pumpattu vesivoima 10
3.3 Litiumioniakut 11
3.4 Vetyvarastot ja polttokennot 12
4. PARAMETRIT ENERGIANVARASTOINTIMUOTOJEN VERTAILUUN 13
4.1 Vasteaika 13
4.2 Skaalautuvuus ja purkautumisaika 14
4.3 Elinkaarikustannukset 15
4.4 Tasoitetut varastointikustannukset 15
4.5 Haasteet ja riskit 16
5. ENERGIANVARASTOINTIMUOTOJEN PARAMETRIEN TARKASTELU JA VERTAILU 17
5.1 Vasteaika ja sähkömarkkinat 17
5.2 Mahdollisuudet eri käyttökohteissa. 18
5.3 Elinkaarikustannusten vertailu 19
5.4 Tasoitetuttujen varastoinnin kustannuksien vertailu 21
5.5 Teknologioille ominaiset haasteet ja riskit: 23
5.6 Yhteenveto vertailusta 24
6. PÄÄTELMÄT 26
LÄHTEET 30
7. LIITTEET 33

LYHENTEET JA MERKINNÄT

HFC	Engl. Hydrogen Fuell Cell, vetypolttokenno, vetyvarasto
LCCOS	Engl. Life-Cycle Cost of storage, energian varastoinnin elinkaarikustannukset.
LCOE	Engl. Levelised Cost of Energy
LCOS	Engl. Levelised Cost of Storage
LIB	Engl. Lithium ion battery, litiumioniakku, litiumakku
PHS	Engl. Pumped hydro storage, pumpattu vesivoima, pumppuvesivoima

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Suomen sähköverkko on merkittävän muutoksen keskellä, kun siirrytään tasaisesti sähköä tuottavista fossiilisista polttoaineista epätasaisesti sähköä tuottaviin uusiutuvan energian muotoihin, erityisesti tuuli- ja aurinkovoimaan. Suomessa tuulivoimalat tuottivat vuonna 2022 lähes viidenneksen käytetystä sähköstä ja tämä osuus on koko ajan kasvussa (Tilastokeskus, 2023). Aurinkosähkön osuus kokonaistuotannosta on vielä melko pieni, mutta teknologian hinnan laskiessa se on yleistynyt jatkuvasti (Tilastokeskus, 2023). Tuuli- ja aurinkovoima muodostavat yhdessä noin kolmasosan suomen päivittäisestä tuotantokapasiteetista (Fingrid, 2024b).

Uusiutuvien energianlähteiden osuuden kasvaessa sähkön tuotannosta tulee epätasaisempaa ja vaikeammin ennustettavaa (Zakeri & Syri, 2015a). Epäsuotuisten keliolosuhteiden vallitessa tuuli- ja aurinkovoiman tuotanto voi laskea lähes nollaan. Epätasainen tuotanto synnyttää haasteita sähkön laadun ylläpidossa, sillä sähköjärjestelmän tulee toimia sekä tuulivoiman, että aurinkovoiman minimituotannon aikana (Rohit et al., 2017). Tämä ongelma voidaan ratkaista varastoimalla energiaa korkean tuotannon ja matalan kulutuksen aikana ja edelleen vapauttamalla sitä matalamman tuotannon ja korkean kulutuksen aikana (Steward et al., 2009).

Energiavarastojen käyttöönotto ei ole yksinkertaista, sillä energianvarastointiin on suuri määrä erilaisia teknologioita, joista tulee valita sopivimmat käyttökohteen mukaan. Erityyppiset energiavarastot eroavat toisistaan muun muassa käyttökohteiden, kustannusten ja teknologioille ominaisten sosiaalisten, ekologisten, poliittisten ja lainsäädännöllisten haasteiden osalta. Jotkin teknologiat voivat esimerkiksi olla kalliita ja sopivia vain lyhyen aikavälin varastointiin, kun toiset teknologiat voivat olla halpoja, mutta merkittävää sosiaalista ja ekologista haittaa aiheuttavia. Energianvarastointiarpeen lisääntyessä, eri varastointiteknologioiden ominaisuuksien ja niiden eri toimintaympäristöihin soveltuvuuden tutkiminen on tärkeää.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on perehtyä erilaisiin energianvarastointijärjestelmiin, joita voidaan integroida uusiutuvien energianlähteiden epätasaisen tuotannon tueksi ja kulutuspiikkien tasoittamiseksi. Tarkoituksena on arvioida ja perustella Suomen sähköverkon energian ja tehonvarastointitarvetta ja määritellä parametrit, joiden avulla energianvarastointimuotoja voidaan vertailla. Parametrien avulla energianvarastointimuotoja arvioidaan teknisestä, taloudellisesta, sekä riski- ja haastelähtöisestä näkökulmasta. Tässä työssä tarkastellaan kolmea suomalaiseen käyttötarkoitukseen mahdollisesti soveltuvaa teknologiaa: pumpattua vesivoimaa, litiumioniakkua ja vetyvarastoa. Valittuja teknologioita vertaillaan toisiinsa määriteltyjen parametrien avulla.

Keskeisimmät tutkimuskysymykset:

- Mitkä parametrit ovat tärkeimpiä energiavarastojen vertailussa ja miten valitut energianvarastointimuodot vertautuvat toisiinsa valittujen parametrien perusteella?
- Miten valittuja energianvarastointimuotoja voidaan soveltaa suomen sähköverkossa?

1.3 Tutkimusmetodologia ja -aineisto

Tämä työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa lähdemateriaalina toimivat aiheeseen liittyvät tieteelliset julkaisut sekä relevantit tilastot. Tiedonhaussa hyödynnetään pääosin Scopus tiedonhakupalvelua sekä helmenkasvatusmenetelmää. Aiheeseen perehtyminen aloitettiin käyttämällä seuraavaa hakulauseketta: electrical AND energy AND storage AND (analysis OR overview OR review). Hakutulokset järjestettiin kriteerillä ”most cited”. Hakutuloksen artikkeleista kolme erottui selkeästi eniten viitattuna, joten ne valittiin aiheeseen perehtymisen lähtökohdiksi.

Valitut artikkelit luettiin ja niiden pohjalta kerättiin helmenkasvatusmenetelmällä lisää aineistoa. Helmenkasvatusmenetelmää hyödynnettäessä kriteeristönä oli pääosin Journalin JUFO- luokitus 2 tai 3, mutta joitakin poikkeuksia tehtiin. Helmenkasvatusmenetelmä osoittautui todella hyödylliseksi ja noin puolet artikkeleista on kerätty kyseistä menetelmää hyödyntäen. Työssä käytetyt artikkelit sekä niiden julkaisufoorumit ja JUFO- luokitukset ovat tarkemmin eroteltuna liitteessä 1.

Aineistoon perehtymiseksi hyödynnettiin ”three pass”- menetelmää. Menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta, joista ensimmäisessä tutkimuksen aineisto luettiin nopeasti läpi, keskittyen pääosin tiivistelmään ja päätelmiin. Työhön sopivat aineistot luettiin toiseen

kertaan huolellisesti läpi ja kolmannella kerralla aineistojen relevantteihin osiin palattiin syvällisempää perehtymistä varten.

Aihealueen jatkuvasti kehittyvän luonteen takia tutkimuksessa hyödynnettiin artikkeleiden lisäksi ajankohtaisia tilastoja. Tilastot on noudettu viidestä luotettavasta lähteestä: energiateollisuudesta, energiavirastosta, Fingridistä, International Energy Agencysta (IEA) ja Tilastokeskuksesta. Työssä taloudellisten lukujen vertailussa käytetään valuuttayksikkönä euroa (€). Osassa lähdeaineistoa valuuttayksikkönä on käytetty dollaria ($), joten dollarit ovat muutettu tässä tutkimuksessa euroiksi muuntosuhteella 0.95.

Tulososiota varten artikkelien hakua edistettiin hakusanojen tarkennuksella sekä aihealueen ja julkaisualustojen rajaamisella. Tarkemmat tiedot rajauksista ovat esitettynä taulukossa 1. Alustavasti tarkoituksena oli hakea tulososiota varten lisää kvantitatiivisia lähteitä käyttäen eri hakulausekkeita, mutta tutkimuksen alkuvaiheessa hyödynnetyn helmenkasvatusmenetelmän avulla laadukkaita lähteitä oli jo kertynyt tarpeeksi. Työssä kvalitatiivisten aspektien analysointiin hyödynnettiin muokattua PESTEL-viitekehystä

Taulukko 1. *Tiedonhaussa hyödynnetyt hakulauseet, rajaukset sekä perustelut*

Hakusana	Perustelu	Lisärajaukset	Tuloksia	Valitut
electrical AND energy AND storage AND (analysis OR overview OR review)	Aihealueeseen perehtyminen	**Article title**	78	3
energy AND storage AND (politic* OR soci* OR cost)	Tiedonhaun kohdentaminen erityisesti poliittisiin, sosiaalisiin ja taloudellisiin tekijöihin	**Article title** **Aihealueet**: Energy ja Business Management and accounting **Julkaisualustat**: Applied energy, Energy, Journal of energy storage, Journal of Cleaner production, Renewable and Sustainable	137	7

Artikkeli- ja raporttityyppisiä lähteitä valikoitui kirjallisuuskatsaukseen yhteensä 23 kappaletta. Eniten artikkeleita valikoitui kolmesta julkaisusta: Journal of energy storagesta, Applied energystä ja Energystä. Nämä julkaisualustat keskittyvät energiatekniikkaan ja insinööritieteisiin, mutta kaikilla alustoilla julkaistaan myös talouteen ja liiketoimintaan pohjautuvia artikkeleita. Työssä hyödynnetyt artikkelit olivat suurelta osin teknistaloudellisia, eli niissä käsiteltiin sekä teknisiä, että taloudellisia näkökulmia. Artikkeleiden ja tilastoaineiston lisäksi tutkimuksen teoriaosassa hyödynnettiin oppikirjoja ja luentomonisteita. Vetytreknologian ongelmien korostamiseksi hyödynnettiin yhtä Financial Times lehtijulkaisua.

1.4 Työn rakenne

Työ jakautuu kuuteen lukuun, joista ensimmäinen luku on johdanto. Toisessa luvussa määritellään ja perustellaan lyhyesti Suomen sähköverkon energianvarastointitarve. Tässä luvussa huomioidaan nykyinen tilanne niin tuotannon epätasaisuuden, kuin kulutuspiikkien näkökulmasta ja pyritään löytämään ennusteita näiden muutoksista tulevaisuudessa. Kolmannessa luvussa määritellään ja kuvaillaan valitut energianvarastointiteknologiat: pumpattu vesivoima, perinteiset akut ja vetyvarastot. Teknologiat, niiden nykytila ja tulevaisuuden arviot esitellään lyhyesti. Myös teknologioiden tekninen tausta käydään läpi lyhyesti, jotta lukijan on helpompi ymmärtää teknologioiden vertailua. Kunkin teknologian soveltuvuutta ja käyttökohteita suomalaisessa sähköverkossa pohditaan kirjallisuuden pohjalta. Neljännessä luvussa määritellään kirjallisuuden pohjalta parametrit, joiden avulla varastointiteknologioita on mielekästä vertailla. Viidennessä luvussa valittuja varastointiteknologioita tutkitaan ja vertaillaan määriteltyjen parametrien avulla. Kuudes luku on työn päätelmät, jossa tulosten pohjalta pohditaan kunkin varastointiteknologian soveltuvuutta suomalaiseen sähköjärjestelmään

2. ENERGIAVARASTOJEN MERKITYS SUOMESSA

Tässä luvussa käsitellään Suomen sähköjärjestelmän nykytilaa sekä energian varastointijärjestelmien roolia sähkömarkkinoilla. Sähköjärjestelmän nykytilan osalta keskitytään uusiutuvan energiantuotannon epätasaisuudesta johtuvan varastointitarpeen perusteluun ja arviointiin. Energiavarastojen ja sähkömarkkinoiden osalta tässä luvussa esitellään sähkömarkkinoiden rakenne, eri markkinapaikat sekä energiavarastojen toimintaperiaate tuotannon ja kulutuksen tasapainottajana.

2.1 Uusiutuvan energian tuotannon ja kulutuksen vaihtelu sekä energian varastointitarve

Suomen sähköntuotannon suurimmat päivänsisäiset vaihtelut johtuvat aurinko- ja tuulivoiman epätasaisesta tuotannosta. Aurinko ja tuulivoiman yhteenlaskettu tehokapasiteetti vuoden 2023 lopussa oli noin 8000 MW (Energiateollisuus, 2024; Energiavirasto, 2024). Tehokapasiteetilla tarkoitetaan tässä yhteydessä hetkellistä maksimitehoa, joka energiavarastosta tai tuotantomuodosta voidaan saada. Edellisen perusteella aurinko- ja tuulivoima voivat aiheuttaa epäsuotuisten olosuhteiden vallitessa jopa 8000 MW:n tehovaihteluita Suomen sähköverkossa. Tämä vastaa 40 % sähkön kokonaistuotantokapasiteetista (Energiavirasto, 2023). Energiavarastojen avulla tätä tuotannon epätasaisuutta voidaan kompensoida. Energiavarastojen ei kuitenkaan tarvitse tuottaa Suomessa 8000 MW:n tehoa, sillä osa kulutetusta sähköstä voidaan ostaa Suomen naapurimaista. Ääritilanteissa sähkön kultusta voidaan myös säätää teollisuutta hidastamalla ja jopa rajoittamalla hetkellisesti kuluttaja-asiakkaiden sähkön käyttöä.

Sähkön tuotannon epätasaisuuden lisäksi sähkön kulutus on vaihtelevaa. Sähkön kulutusta mitataan yksikössä MWh/h, joka kuvaa sähkön keskimääräistä tehoa tietyllä aikavälillä. Suomen sähkönkulutus vaihtelee eniten talvella muuttuvan lämmitystarpeen vuoksi. Päivänsisäsinen tehovaihtelu on suurimmillaan noin 3000 MWh/h, joka on noin kolmasosa päivittäisestä keskiarvotehosta (Fingrid, 2024).

Kun vaihtelevatehoisen uusiutuvan energian, eli pääosin tuuli- ja aurinkovoiman osuus, ylittää 40 % - 50 % kokonaistuotannosta, energiavarastojen varastointikapasiteetin tarve lisääntyy merkittävästi (Zsiborács et al., 2019). Varastointikapasiteetilla tarkoitetaan tässä yhteydessä energiamäärää, joka sähköverkon varastoihin voidaan säilöä. Suomi saavuttaa 40 % rajan todennäköisesti 2030 mennessä (Fingrid, 2022). Zsiborácsin et al.

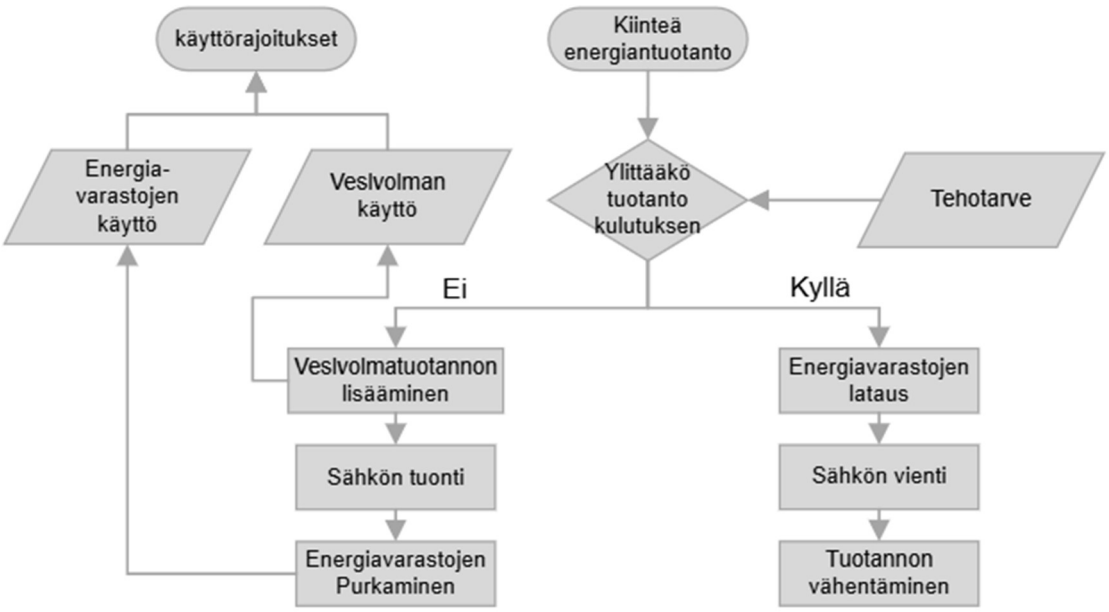
(2019) mukaan 40 % rajan saavuttamisen jälkeen energianvarastointitarve on 0.034 % vuotuisesta sähköntuotannosta. Tämä luku kasvaa 1.5 prosenttiin kun saavutetaan 95 % vaihtelevatehoisen uusiutuvan tuotannon määrä. Suomen vuotuisen tuotannon ollessa noin 80 TWh energianvarastointitarve voisi olla vuonna 2030 noin 27.2 GWh (Tilastokeskus, 2024).

Suomen toimintaympäristö mahdollistaa energiavarastojen laajamittaisen käytön, sillä Suomen sähköjärjestelmä on edistynyt sekä kestävä, ja kykenee toimimaan energiavarastojen kanssa. Tämä ei ole totta globaalisti, sillä tehokkaiden energiavarastojen implementointi voi vaatia suuria investointeja sähköverkon kehittämiseen, jotta energiavarasto kykenee toimimaan.

Tässä alaluvussa esitellyt luvut ja tilastot heijastavat jatkuvasti kasvavaa epävarmuutta sähköjärjestelmässä. Niiden tarkoituksena ei ole niinkään määrittää definitiivistä tarvetta energianvarastoinnille, vaan korostaa nykyisen sähköjärjestelmän ongelmia ja motivoida energianvarastointijärjestelmien tutkimiseen ja kehittämiseen.

2.2 Sähkömarkkinat

Sähkön varastointitarpeen arviointi yksittäisille valtioille on hyödyllistä, mutta sei ei kuitenkaan anna täydellistä kokonaiskuvaa oikeasta varastointitarpeesta, sillä sähköä voidaan ostaa Pohjoismaiden yhteisiltä sähkömarkkinoilta, Nord Poolista. Jos sähkömarkkinoilta ostettavan sähkön hinta nousee kalliiksi, voidaan hyödyntää energiavarastoja. Energiavarastojen avulla sähköä voidaan varastoida, kun kysyntä on vähäistä, ja vapauttaa takaisin verkkoon kysynnän kasvaessa (Mostafa et al., 2020). Sähkö hyödykkeenä on hieman erilainen kuin muut hyödykkeet, sillä sähkön kulutuksen ja tuotannon tulee aina olla tasapainossa. Jos tuotanto ja kulutus eivät vastaa, verkon taajuus muuttuu, ja sähkölaitteet voivat lakata toimimasta. Energiavarastojen hyödyntämistä sähköjärjestelmässä on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. *Energiavarastojen hyödyntäminen sähköjärjestelmässä. (Koivunen et al., 2022, s.1344)*

Kuvassa esitetään vesivoimatuotanto muusta energianvarastoinnista erillisenä osana ja sillä tarkoitetaan perinteistä, luonnollisten virtausten patoamiseen perustuvaa vesivoimaa (Koivunen et al., 2022). Tässä tutkimuksessa käsiteltävä pumpattu vesivoima sisältyy kuvassa energiavarastoihin. Kuvasta 1 nähdään, että energiavarastoja hyödyntämällä sähkön tuotantoa sekä kulutusta voidaan tasapainottaa. Tämä tarkoittaa myös sähkön hinnan tasapainottumista.

Toimiakseen tuotantoa ja kulutusta tasaavana elementtinä energiavarastojen tulee osallistua sähkömarkkinoille. Sähkömarkkinat voidaan jakaa neljään osaan kaupankäynnin ajankohdan mukaan seuraavasti: käyttötunnin sisäiset markkinat (Reservimarkkinat), päivän sisäinen markkina (intraday), edeltävän päivän markkina (day ahead) ja pitkän aikajänteen markkina (Partanen et al., 2021). Reservimarkkinat ovat suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin operoima markkina, josta Fingrid ostaa ja myy sähköä kulutuksen ja tuotannon tasaamiseksi (Fingrid, 2017). Se jakautuu edelleen vaaditun toimitusnopeuden, eli vasteajan mukaan taulukossa 2 esiteltyihin reservituotteisiin.

Taulukko 2. *NordPool sähkömarkkinan reservituotteet (Fingrid, 2017, s. 5).*

Lyhenne	FFR	FCR-D	FCR-N	aFRR	mFRR
Nimi	Nopea taajuus-reservi	Taajuusohjattu häiriöreservi	Taajuusohjattu käyttöreservi	Automaattinen taajuudenpalautus-reservi	Säätösähkö- ja säätö-kapasiteettimarkkinat
Vaadittu vasteaika	1 s	s	3 min	5 min	12,5 min

Tuotannon osalta keliolosuhteiden, jotka määrittävät suuresti tuotantoa ja kulutusta, ennustaminen etukäteen voidaan tehdä melko tarkasti. Tästä syystä energiavarastot tasapainottavana tekijänä sisältyvät edeltävän päivän markkinaan, päivän sisäiseen markkinaan ja pidemmän vasteajan reservimarkkinoihin, erityisesti kapasiteettimarkkinoihin. Käytettävän teknologian mukaan se voi soveltua myös muille markkinapaikoille. Muut markkinapaikat esitellään tarkasti, sillä niissä on tarkat vasteaikavaatimukset, joihin markkinalla operoivan energiavaraston tulee pystyä vastaamaan. Teknologian soveltuessa laaja-alaisesti monille markkinoille sillä voidaan tuottaa merkittävää lisäarvoa laitoksen omistajille ja asiakkaille.

3. ENERGIANVARASTOINTIMUODOT

Tässä luvussa esitellään yleisesti käytössä olevia energianvarastointimuotoja sekä tarkastellaan tässä työssä tutkittavia varastointimuotoja tarkemmin. Ensimmäisessä alaluvussa esitellään yleisesi käytössä olevat energianvarastointimuodot sekä perustellaan tämän työn tarkastelukohteeksi valitut varastointimuodot. Sitä seuraavissa alaluvuissa käydään lyhyesti läpi valitut energianvarastointimuodot, niiden toimintaperiaate, mahdollinen asema sähkömarkkinalla ja käyttökohteet.

3.1 Energianvarastointimuotojen valinta

Energianvarastoinnin eri ratkaisut voidaan jakaa kuuteen luokkaan: mekaaniseen, sähkökemialliseen, sähköiseen, lämpökemialliseen, kemialliseen ja lämpöenergiaan (Luo et al., 2015). Luokat voidaan edelleen jakaa eri teknologioihin kuvan 2 mukaisesti. Tässä työssä tutkitaan tarkemmin mekaanista, sähkökemiallista ja kemiallista energian varastointia. Tämä valinta tehtiin, sillä mekaaninen sekä sähkökemiallinen varastointi ovat jo vakiintuneessa käytössä sähköjärjestelmien tukena ja kemiallinen varastointi, erityisesti vetyvarastot, on jatkuvasti kehittyvä teknologia, jonka implementointiin on suuria tavoitteita. Sähköinen varastoiti ei sovellu tuntien mittaiseen käyttöön (Gür, 2018), joten sitä ei voida hyödyntää tuotannon ja kulutuksen tasaamisessa. Lämpökemiallinen varastointi on uusi, täysin kehittymätön konsepti, jonka teknisiä tai taloudellisia aspekteja ei voida vielä arvioida luotettavasti (Luo et al., 2015). Lämpöenergiaksi varastointi jätetään tutkimuksessa huomioimatta, sillä Suomessa lämpövarastoja hyödynnetään usein kaukolämpöjärjestelmissä sähköjärjestelmän sijasta.

***Kuva 2**. Energianvarastointiteknologiat varastointimenetelmän mukaan (Luo et al., 2015, s. 514)*

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kolmea energianvarastointimuotoa: pumpattua vesivoimaa, litiumioniakkuja sekä vetyvarastoja. Pumpattu vesivoima (PHS) on mekaaninen, tällä hetkellä selkeästi yleisin energian varastointimuoto (IEA, 2024a). Se muodostaa noin 67 % maailman energiavarastojen tehokapasiteetista. Sähkökemiallisista varastoista yleisin energianvarastointimuoto on litiumioniakut (LIB), jotka muodostavat noin 30 % tehokapasiteetista. Akkuvarastoista noin 60 % on sähköverkkoon kytkettyjä ja loput koteihin asennettuja (behind the meter) - systeemejä, joista ei voi syöttää virtaa sähköverkkoon. Tässä tutkimuksessa keskitytään sähköverkkoon kytkettyihin akkuihin. Muilla varastointimuodoilla on tällä hetkellä melko pieni rooli sähköverkon energianvarastoinnissa. (IEA, 2024a) Sähköverkon energianvarastoinnin toimintakenttä on muuttunut lähivuosina merkittävästi, sillä vielä vuonna 2017, pumpattu vesivoima muodosti 97 % kaikista sähköverkon energiavarastoista (IEA, 2017). Litiumioniakkujen suosio on siis kasvanut merkittävästi vuosien 2017–2024 välillä. Tässä työssä tarkastellaan pumpatun vesivoiman ja akkujen lisäksi vetyteknologian, erityisesti vetypolttokennojen (HFC) mahdollisuuksia. Vetypolttokennoja tarkastellaan, sillä ne ovat jatkuvan huomion ja suurten tavoitteiden kohteena (Moore, 2024).

3.2 Pumpattu vesivoima

Vesivoimalla tuotetaan suuri osa, vuonna 2016 yli 16 %, maailman sähköntuotannosta. Vesivoimaa on käytetty teollisella mittakaavalla yli 100 vuotta, 1900- luvun alusta saakka. (Gür, 2018) Vesivoiman osuudesta noin kolme prosenttiyksikköä on pumpattua vesivoimaa (Hossain et al., 2020). Pumpattu vesivoima on perinteisen vesivoiman sovellus, jossa luonnollisen virtauksen patoamisen sijaan vettä pumpataan korkeammalla sijaitsevaan varastoon. Pumpattua vesivoimaa on hyödynnetty vuodesta 1944 alkaen. (Hossain et al., 2020) Pumpattu vesivoima on kypsä teknologia, jonka ei uskota kehittyvän merkittävästi tulevaisuudessa (Zakeri & Syri, 2015).

Pumpattu vesivoima perustuu veden potentiaalienergian varastointiin. Vettä pumpataan matalammalla olevasta vesisäiliöstä korkeammalla sijaitsevaan. Kun potentiaalienergia halutaan vapauttaa, se päästetään korkeammasta säiliöstä vesiturbiinin läpi matalampaan säiliöön. Turbiini on yhdistetty generaattoriin, joka tuottaa sähköä turbiinin pyöriessä. (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020) Tyypillisesti PHS-laitokset ovat suuria ja vesialtaiden korkeusero onkin satoja metrejä (Hossain et al., 2020).

Edellisen kappaleen perusteella nähdään, että pumpattu vesivoima on siis hyvin yksinkertainen ja toimintavarma energianvarastointimuoto. Sen käyttökohteet ovat kuitenkin melko rajatut, sillä pumpattu vesivoima vaatii luonnollisia korkeuseroja sekä maaperän,

johon altaat voi rakentaa, jotta se voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti. Pumpattu vesivoima on jo vakiintunut osa sähkömarkkinoita pitkän historiansa vuoksi. Sitä hyödynnetään yleisimmin day ahead- ja intraday-markkinoilla, sekä hitaan vasteajan reservimarkkinoilla.

3.3 Litiumioniakut

Akut ovat ehkäpä tunnetuin sähköenergian varastointimuoto. Yleisin käytetty akkuteknologia nykypäivän sähkövarastoissa on litiumioniakut (IEA, 2024b). akkuja on yleisesti käytetty energiavarastointiin pienessä mittakaavassa, kuten kannettavissa tietokoneissa ja puhelimissa 1990- luvulta saakka (Gür, 2018; Hossain et al., 2020). Akkuja käytetään myös suuremman mittakaavan energiavarastona sähköverkossa, ja se onkin tällä hetkellä nopeimmin yleistyvä teknologia sähköverkon energian varastoinnissa (IEA, 2024b; Zakeri & Syri, 2015). Joidenkinkin lähteiden mukaan litiumioniakut ovat kypsä teknologia, jonka tulevaisuuden kehitys tulee olemaan inkrementaalista (Koohi-Fayegh & Rosen, 2020). Hossain et al. (2020) väittävät kuitenkin litiumioniakkujen olevan vielä nopeasti kehittyvä, kaupallisella tasolla oleva teknologia. Tätä väitettä tukevat jatkuvat innovaatiot litiumioniakkuteknologiassa muun muassa perinteisten- ja nanomateriaalien osalta (Liu et al., 2020; Mostafa et al., 2020)

Akkujen toimintaperiaate perustuu sähköenergian kemialliseen varastointiin. Akku on galvaaninen kenno, jossa kaksi erilaista sähköisen potentiaalin omaavaa materiaalia (elektrodi) upotetaan elektrolyyttiin. Elektrodien välille syntyy jännite, ja kun ne yhdistetään virtapiirinä, akku tuottaa hapetus-pelkistysreaktion kautta sähkövirtaa. (Crompton, 2000, s. 3).

Akkuvarastot ovat erittäin monipuolinen energiavarastointiteknologia. Ne ovat kokoluokaltaan todella joustavia, sillä akkusoluja voidaan kytkeä yhteen rinnan tai sarjaan, luoden eri ominaisuuksilla toimivia akkuja. Akut ovat myös logistisesti hyvä ratkaisu, sillä niillä on melko suuri energiatiheys. Tämä tarkoittaa, että pieneen määrään akkuja saadaan sidottua paljon energiaa. (Hossain et al., 2020) Tämä mahdollistaa akkujärjestelmien siirtämisen ja esimerkiksi vanhojen akkuvarastojen korvaamisen uusilla. Tämän hetken kaupallisesti kannattavat akkuvarastot toimivat taajuusreservinä (Koivunen et al., 2022). Näissä käyttötarkoituksissa energiavarastot ovat kokoluokaltaan usein melko pieniä. Litiumioniakkujen tulevaisuus kuitenkin vaikuttaa lupaavalta ja niiden käytön oletetaan yleistyvän myös suuremman mittakaavan varastoinnissa (Schmidt et al., 2019).

3.4 Vetyvarastot ja polttokennot

Vetyvarastot ovat koko ajan suosiotaan kasvattava energian varastointimuoto. Kiinnostus vetyvarastoihin perustuu siihen, että vetyvarastot ovat ekologisia ja energiatiheitä ratkaisuja. Vetyvarastot eivät ole kuitenkaan yleistyneet pilottihankkeiden yli suurten kustannusten ja sekavien poliittisten tahtotilojen takia. Mooren (2024) mukaan Eurooppaan on suunnitteilla suuria määriä vetyinfrastruktuuria. Esimerkiksi vuoteen 2030 mennessä on tavoitteena rakentaa jopa 28 000 kilometrin mittainen vedynsiirtoverkosto. Tästä verkostosta on kuitenkin rakenteilla tähän mennessä vain 30 kilometriä. (Moore, 2024) Voidaan siis huomata, että teknologia ei ole vielä aivan valmis sille asetettuihin tavoitteisiin.

Sähköenergian varastoinnissa vetyvarastoilla tarkoitetaan prosessia, jossa vety tuotetaan, säilötään ja muutetaan takaisin sähköksi (Zakeri & Syri, 2015). Tässä työssä tarkastellaan erityisesti vedyn tuotantoa elektrolyyserillä, sillä se on mahdollista toteuttaa pienillä päästöillä hyödyntäen uusiutuvaa energiaa (Luo et al., 2015; Zakeri & Syri, 2015). Vedyn tuotanto elektrolyyserillä perustuu elektrolyysiin, jossa vesimolekyyli hajotetaan vedyksi ja hapeksi. Tämä reaktio sitoo paljon energiaa. Vety voidaan säilöä monilla eri tavoilla esimerkiksi paineistettuna kaasuna, nesteenä tai metallihydridien kiderakenteeseen. Vedyn sitoma energia voidaan tarvittaessa vapauttaa polttokennossa, jossa vety reagoi hapen kanssa elektrolyytin avulla muodostaen vettä, lämpöä sekä sähköenergiaa. (Luo et al., 2015; Zakeri & Syri, 2015) Vetyvarastojen kokonaishyötysuhde on huono, parhaimmillaankin vain 66 % (Hossain et al., 2020). Tästä syystä vetyvaraston lataaminen on merkittävästi muita varastointimuotoja kalliimpaa. Jos lataamiseen joudutaan käyttämään fossiilisia polttoaineita, myös päästöt kasvavat huonon hyötysuhteen takia merkittävästi

Tällä hetkellä vetyvarastojen huonon hyötysuhteen ja todella suurten pääomakustannusten takia teknologiaa ei hyödynnetä vielä suuressa mittakaavassa (Zakeri & Syri, 2015). Vetyvarastoja voidaan teoriassa hyödyntää sekä pienen että suuren mittakaavan varastoihin (Hossain et al., 2020).

4. PARAMETRIT ENERGIANVARASTOINTIMUOTOJEN VERTAILUUN

Seuraavissa kappalaisessa esitellään energianvarastointimuotojen vertailun kannalta tärkeitä parametrejä. Parametrit voidaan jakaa seuraaviin kategorioihin: teknisiin, teknistaloudellisiin sekä haasteisiin ja riskitekijöihin. Nämä kategoriat voidaan jakaa tarkemmin parametreihin, joita tässä työssä käsitellään. Hossain et al. (2020) esittelee puhtaasti teknisiä parametrejä: vasteaika, tehokapasiteetti ja varaston purkautumisaika. Nämä parametrit rajaavat energianvarastointimuodon mahdollisia käyttökohteita. Tehokapasiteettia ja purkautumisaikaa käsitellään tässä työssä yhdessä, sillä ne rajaavat energiavaraston mittakaavaa. Teknistaloudellisista parametreistä tärkeimpiä ovat elinkaarikustannukset ja tasoitetut sähkön kustannukset (Mostafa et al., 2020; Zakeri & Syri, 2015). Tässä tutkimuksessa perehdytään myös kunkin energianvarastointiteknologian suurimpiin haasteisiin ja riskitekijöihin.

4.1 Vasteaika

Vasteajalla tarkoitetaan aikaa, joka energiavarastolta vaaditaan energian vapauttamisen alkamiseksi (Hossain et al., 2020). Vasteaika määrittää siis, mille sähkömarkkinoille tietyllä energiavarastolla voidaan osallistua. Tutkimuksen tarkoituksena on tutkia lähinnä kulutuksen ja tuotannon tasaamista, mutta moneen käyttötarkoitukseen sopivat teknologiat voivat lisätä niiden houkuttelevuutta. Vasteaika linkittyy myös tutkimuksessa tarkasteltaviin taloudellisiin parametreihin.

Vasteaikaa mitataan pääosin millisekunneissa, sekunneissa ja minuuteissa. Soveltuakseen tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen, energiavaraston vasteajan tulee olla maksimissaan joitakin minuutteja. (Hossain et al., 2020; Zakeri & Syri, 2015) Joitakin minuutteja lyhempi vasteaika nähdään tutkimuksessa positiivisena tekijänä sen tuoman taloudellisen potentiaalin takia. Taloudellinen potentiaali perustuu siihen, että energiavarasto voi lyhyen vasteajan takia osallistua monipuolisemmin taulukossa 2 esitellyille reservimarkkinoille. Etenkin tuotannon tasaamiseen liittyvä vasteaika voi olla joissakin tapauksissa pidempi, sillä uusiutuvien energianlähteiden tuottaman tehon muutoksia voidaan ennustaa tunteja tai päiviä etukäteen.

4.2 Nimellisteho ja purkautumisaika

Nimellisteholla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa sitä, mihin tehontuotantovaatimuksiin kukin varastointiteknologia sopii. Tässä alaluvussa käsitellään myös käsite purkautumisaika, sillä nimellistehon ja purkautumisajan yhdistämällä voidaan havainnollistaa mihin käyttötarkoituksiin ja minkä mittakaavan sovelluksiin energiavarastoa voidaan hyödyntää. Valittu teknologia määrittää siis ala- ja ylärajan sille, minkä verran tehoa varastosta voidaan saada ja kuinka kauan tätä tehoa voidaan saada.

Zakeri ja Syri (2015) luokittelevat energiavarastot kolmeen eri luokkaan: Pitkän aikavälin, keskipitkän aikavälin ja lyhyen aikavälin varastoihin. Pitkän aikavälin varaston tulee toimia vähintään 10 MW teholla 4–8 tunnin ajan, keskipitkän aikavälin varaston tulee toimia 1–10 MW teholla 0.5–2 tunnin ajan ja lyhyen aikavälin varaston tulee toimia 0.1–2 MW teholla alle 15 minuutin ajan. Luo et al. (2015) tarkentavat tehon ja purkautumisajan tarpeita käyttökohteen mukaan. (Luo et al., 2015) esittävät neljä käyttökohdetta, jotka liittyvät kulutuksen ja tuotannon tasapainottamiseen. Kohteet sekä niissä toimimiseen vaadittu teho ja purkautumisaika on esitetty taulukossa 4.

***Taulukko 3**. Kirjallisuudessa tunnistetut tehtävät sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi (Luo et al., 2015, s. 527)*

Alkuperäinen termi	Käännös	Vaadittu teho	purkautumisaika
Ramping and load following	Tehon nostaminen ja kuormituksen seuraaminen	MW luokka Jopa satoja MW	Minuuteista muutamiin tunteihin
Time shifting	Kulutuksen siirto	1–100 MW	3–12 h
Peak shaving	Tehohuippujen pienentäminen	100 kW–100 MW	1–10 h
Load levelling	Kuormituksen tasaaaminen	MW luokka Jopa useita satoja MW	12 tuntia ja enemmän.

Taulukosta 4 nähdään, että riippuen tehtävästä, vaadittu teho voi olla sadoista kW useisiin satoihin MW ja purkautumisaika vaihtelee minuuteista kymmeniin tunteihin. Tehtävät sijoittuvat siis suureksi osaksi keskipitkän aikavälin varastoihin. Tämän tutkimuksen kontekstissa kulutuksen siirto ja huippujen pienentäminen voidaan nähdä energiavarastojen tärkeimpänä tehtävänä ja muihin tehtäviin soveltuminen voidaan nähdä kilpailuetuna.

4.3 Elinkaarikustannukset

Zakeri ja Syri (2015) tunnistavat elinkaarikustannusten (LCCOS) olevan kriittinen parametri energianvarastointimuotojen vertailuun. Elinkaarikustannukset on laajasti erilaisilla teknologiasektoreilla hyödynnetty kokonaiskustannusten mittari. Energiavarastojen elinkaarikustannuksiin vaikuttavat seuraavat tärkeät tekniset parametrit: Sähköteho, purkautumisaika, hyötysuhde, tehotiheys, energiatiheys, varastoinnin kestoaika ja itsepurkautuminen (Zakeri & Syri, 2015). Taloudellisia parametrejä, jotka vaikuttavat elinkaarikustannuksiin, ovat investointikustannukset, kiinteät ja muuttuvat käyttökustannukset sekä huolto-, korjaus- ja vaihtokustannukset (Mostafa et al., 2020; Zakeri & Syri, 2015). Näitä parametrejä ei kuitenkaan tarkastella tässä työssä tarkemmin, vaan elinkaarikustannuksia tarkastellaan omana parametrinään, joka sisältää edellä mainitut tekniset ja taloudelliset aspektit.

Elinkaarikustannuksia mitataan usein vuosittaisilla elinkaarikustannuksilla, jossa elinkaarikustannukset jaetaan varastointimuodon arvioidulla käyttöiällä. Vertailua varten nämä kohdistetaan lähes aina tehoyksikköä kohden, jolloin vuotuisten elinkaarikustannusten yksiköksi tulee $\frac{€}{kW*vuosi}$. (Mostafa et al., 2020)

4.4 Tasoitetut varastointikustannukset

Tasoitetut varastointikustannukset (LCOS) kuvaavat kuinka paljon yhden energiayksikön varastointi maksaa.(Mostafa et al., 2020). LCOS on melko uusi käsite, mutta se on suoraan verrattavissa sähkön tuotantoon liittyvään käsitteeseen tasoitetut sähkön tuotantokustannukset (LCOE) (Schmidt et al., 2019). Schmidt et al. (2019) määrittelee tasoitetut sähkön varastointikustannukset kaavan 1 mukaan seuraavasti:

$$LCOS\left[\frac{€}{MWh}\right] = \frac{sijoituskustannukset + \sum_n^N \frac{K\&YK}{(1+r)^n} + \sum_n^N \frac{LK}{(1+r)^n} + \frac{KPK}{(1+r)^N}}{\sum_n^N \frac{Vapautettu\ sähkö}{(1+r)^n}}, \quad (1)$$

jossa K&YK on käyttö- ja ylläpitokustannukset, LK on latauskustannukset ja KPK on käytöstä poiston aiheuttamat kustannukset. Vapautetulla sähköllä tarkoitetaan kaikkea energiaa, mikä energiavaraston läpi kulkee sen elinkaaren aikana. LCOS-määritelmä vaihtelee lähteiden välillä, sillä jotkin lähteet eivät huomioi käytöstä poiston kustannuksia.

Vaikka LCOS mittaa melko samankaltaiselta vaikuttavaa asiaa kuin LCCOS, LCOS ottaa huomioon varaston läpi kulkeneen energian määrän, joka voi olla erisuuruinen eri varastointiteknologioilla. LCOS keskittyy siis energiavaraston läpi kulkevaan energiaan sen tehon sijasta. Ero varaston läpi kulkeneessa energiassa johtuu aiemmin määritellyistä vasteajasta ja skaalautuvuudesta, jotka määrittävät mille sähkömarkkinoille teknologian avulla voidaan osallistua ja mihin käyttötarkoituksiin sitä voidaan käyttää. Jos teknologia on sovellettavissa useammilla markkinoilla ja käyttökohteissa, saadaan sille todennäköisesti enemmän vuotuisia käyttötunteja, ja tästä syystä sen läpi kulkee enemmän energiaa. Yhtälöstä 1 nähdään, että energiavaraston tasoitetut sähkönvarastointikustannukset ovat siis kääntäen verrannolliset sen läpi kulkeneen energian määrään

4.5 Haasteet ja riskit

Teknisten ja teknistaloudellisten tekijöiden lisäksi tässä tutkimuksessa perehdytään energianvarastointimuotojen suurimpiin kirjallisuudessa tunnistettuihin haasteisiin ja riskeihin. Haasteiden ja riskien luokitteluun on käytetty muokattua PESTEL- analyysiä. Perinteisesti PESTEL- analyysi koostuu poliittisista, taloudellisista, sosiaalisista, teknologisista, ekologisista ja lainsäädännöllisistä tekijöistä, mutta tässä työssä taloudelliset näkökulmat käydään jo muiden parametrien avulla tarpeeksi kattavasti läpi, joten ne jätetään huomiotta.

PESTEL- analyysin hyödyntäminen mahdollistaa kattavan ja järjestelmällisen tavan arvioida energianvarastointimuotoja. Energia-alalla poliittiset ja lainsäädännölliset tekijät ovat suuressa roolissa, sillä regulaatiot ja sopimukset, esimerkiksi ilmastosopimukset, vaikuttavat merkittävästi eri teknologioiden hyödyntämismahdollisuuksiin. Ekologiset näkökulmat nähdään tärkeänä osana, sillä energiavarastojen tarkoituksena on tukea vihreää siirtymää ja uusiutuvien energianlähteiden lisäämistä. Energianvarastointiteknologian ekologiset vaikutukset tulee arvioida, jotta niiden sopivuudesta vihreän siirtymän edistämiseen voidaan varmistua. Sosiaaliset tekijät, kuten energiavarastojen aiheuttamat haitat luonnon estetiikalle ja ihmisten turvallisuuteen kohdistuneet haitat, on myös tärkeä huomioida.

Ekologisten ja sosiaalisten tekijöiden taustalla on usein teknologiset tekijät, jotka mahdollistavat, mutta myös rajoittavat teknologian hyödyntämistä. Jotkin energianvarastointimuodot voivat esimerkiksi syttyä herkästi palamaan ja toiset voivat olla kooltaan niin suuria, että ne aiheuttavat visuaalista haittaa ja tuhoavat luontoa. Toisaalta teknologinen näkökulma ottaa myös kantaa siihen, minkälaiset kehitysmahdollisuudet kullakin teknologialla on.

5. ENERGIANVARASTOINTIMUOTOJEN PARAMETRIEN TARKASTELU JA VERTAILU

Tässä luvussa tarkastellaan ja vertaillaan valittuja energianvarastointimuotoja hyödyntäen aiemmassa luvussa määriteltyjä parametrejä. Energianvarastointimuotojen vahvuudet ja heikkoudet pyritään tuomaan esille mahdollisimman selkeästi, joten viimeisimpänä alalukuna on yhteenveto, jossa vahvuudet ja heikkoudet kerrataan tiiviisti.

5.1 Vasteaika ja sähkömarkkinat

Kirjallisuudessa ollaan melko yksimielisiä kunkin vertailussa olevan sähkönvarastointimuodon vasteajasta. Akkuvaraston vasteaika on joitakin millisekunteja (Luo et al., 2015). Tämä tarkoittaa, että se soveltuu vasteajan perusteella kulutuksen ja tuotannon tasaamisen lisäksi kaikkiin muihin sähköverkon sovelluskohteisiin. Akkuvaraston nopea vasteaika perustuu siihen, että sähkökemialliset reaktiot alkavat akun sisällä välittömästi, kun sen navat yhdistetään

Polttokennojen vasteajaksi on lähes kaikessa kirjallisuudessa esitetty joitakin sekunteja (ks. Hossain et al., 2020; Luo et al., 2015). Näissä tutkimuksissa polttokennojen vasteaika on lainattu Schoenung, (2001) tutkimuksesta. Tämä tarkoittaa, että vetyvarastoja ei voida hyödyntää nopeassa taajuusreservissä. Gür (2018) esittää kuitenkin, että polttokennojen vasteaika voi olla aikaisemmin ehdotettua pidempi, sekunneista jopa minuuttiin. Tämä rajoittaa vetyvarastojen käyttömahdollisuuksia edelleen, sillä vasteajan noustessa kymmeniin sekunteihin tai minuuttiin, vetyvarastoa ei voida enää hyödyntää taajuusohjattuna häiriöreservinä. Vedyn hyödyntäminen ja polttokennot ovat vielä kehittyvä teknologia, joten on mahdollista, että vasteaikaa saadaan vielä merkittävästi parannettua erilaisten materiaali- ja teknologiainnovaatioiden kautta.

Pumpatun vesivoiman vasteaika on yleisesti ymmärretty olevan joitakin minuutteja. Uusimpien, modernien voimaloiden vasteaika voi olla hieman lyhyempi. Parhaimmillaan pumpatun vesivoiman vasteajaksi on saatu vain kymmeniä sekunteja. (ks. Gür, 2018; Hossain et al., 2020; Luo et al., 2015). Suhteellisen hidas vasteaika tarkoitta, ettei pumpattua vesivoimaa voida käyttää nopeassa taajuusreservissä. Suurin osa pumppuvesivoimaloista sopii vasteaikansa puolesta Taajuusohjattuun häiriöreserviin, mutta kaikista hitaimmalla vasteajalla toimivat eivät todennäköisesti sovellu tähän käyttöön. Muilla sähkömarkkinapaikoilla pumpattua vesivoimaa voidaan teoriassa hyödyntää. Koohi-Fayegh ja Rosen (2020) mukaan muuttuvanopeuksisia generaattoreita PHS käyttöön kehitetään

jatkuvasti. Näitä generaattoreita hyödyntämällä pumpattua vesivoimaa voidaan mahdollisesti hyödyntää lyhyemmän vasteajan käyttökohteisiin, sillä turbiinilla voidaan tuottaa sähköä myös turbiinin pyörimisnopeuden kiihtyessä. Monimutkaisemmat generaattorit ovat todennäköisesti kalliimpia ja niiden tueksi voimalaitoksen muita osia, kuten ohjausjärjestelmää tulee kehittää sopivaksi generaattorien kanssa, edelleen kasvattaen kustannuksia.

Luo et al. (2015) esittää hybridivarastot ratkaisuksi hitaampien energiavarastojen rajoitettuun markkinamahdollisuuteen. Hybridivarastot ovat yhdistelmä kahdesta tai useammasta energiavarastosta (Luo et al., 2015), esimerkiksi akuista ja pumppuvesivoimalasta. Esimerkissä PHS-voimalaan kytkettäisiin pieni akusto, jonka tarkoituksena on vapauttaa sähköä PHS-voimalan käynnistyessä.

5.2 Mahdollisuudet eri käyttökohteissa.

Energianvarastointimuotojen nimellistehoja sekä purkautumisaikoja on kerätty taulukkoon 4. Arvojen suuruusluokasta ollaan lähes kaikissa tapauksissa yksimieleisiä, mutta Zakeri ja Syri (2015) esittävät litiumioniakun suurimmaksi nimellistehoksi 0.01MW. Tämä lienee virheellinen arvo, sillä Zakeri ja Syri (2015) esittävät samassa julkaisussa litiumioniakkujen soveltuvan keskipitkiin varastoihin, joissa vaadittu teho on 1–10 MW.

Taulukko 4. *Energianvarastointimuotojen nimellistehot ja purkautumisajat eri kirjallisuuden lähteiden mukaan*

	Maksimiteho (MW)			Purkautumisaika		
Kirjoittajat	**PHS**	**HFC**	**LIB**	**PHS**	**HFC**	**LIB**
Luo et al. (2015, s. 525 & 527)	100–5000	0–58.8	<100	1- 24 h+	S – 24 h+	1 min–8 h
Hossain et al. (2020, s. 74–76)	30–5000	0–58.5	<100	1–24 h	S – 24 h	Min - h
Gür, (2018, s. 2751)	100–2500	0.01–100	0.05–100	4–16 h	Min - vko	1 min–8 h
Zakeri & Syri (2015, s. 592)	10–5000	0.3–50	1–10	1–24 h	S – 24 h	Min - h

Taulukosta 4 havaitaan, että pumpatun vesivoiman nimellisteho vaihtelee kymmenien ja tuhansien MW välillä ja purkautumisaika tunnista yli vuorokauteen. Tämä tarkoittaa, että PHS on sovellettavissa laajasti moniin eri tarkoituksiin, erityisesti suuren mittakaavan energianvarastointiin. PHS voidaan ainakin teoriassa ottaa käyttöön jopa tuntia lyhyempään käyttöön, mutta kirjallisuudessa ei mainita esimerkkejä tästä.

Vetypolttokennoja voidaan taulukon 4 perusteella hyödyntää alle 100 MW:n energiavarastoissa. Teknologian kehittyessä kaupallisten vetypolttokennojen teho voi kuitenkin

kasvaa merkittävästi. Vetypolttokennojen purkautumisaika on sekunneista jopa yli vuorokauteen. Gürin (2018) mukaan maan kuoren suuriin luoliin varastoituna vetyvaraston purkautumisaika voi olla jopa viikon mittainen. Tämän mahdollistaa se, että vety voidaan varastoida esimerkiksi paineistettuna tai nesteenä, jolloin sen energiatiheys saadaan merkittävästi, jopa satoja kertoja suuremmaksi kuin muiden vertailussa olevien ratkaisujen (Hossain et al., 2020; Zakeri & Syri, 2015). Energiatiheytensä ansiosta pieneenkin vetyvarastoon voidaan varastoida suuria määriä energiaa. Vetypolttokennoja voidaan teknologian yleistyessä hyödyntää monipuolisesti erilaisissa kulutuksen ja tuotannon tasoittamisen tehtävissä, joskin sen maksimiteho on vielä melko rajoittunut

Litiumioniakut ovat taulukon 4 perusteella kaikkein haasteellisin energianvarastointimuoto huippujen pienentämiseen ja kulutuksen siirtoon. Akkujen teho on samaa luokkaa vetypolttokennojen kanssa, mutta purkautumisaika on kirjallisuuden perusteella rajoittunut noin kahdeksaan tuntiin. Tämä tarkoittaa, että vain suurimmat akut soveltuvat kulutuksen ja tuotannon tasaamiseen. Akkujen koolle ei kuitenkaan ole teoreettista rajaa, sillä akkuja voidaan kytkeä toisiinsa, muodostaen yhden suuremman akun. Akkuteknologia kehittyy jatkuvasti ja tämänhetkinen tutkimus litiumioniakkujen osalta keskittyy akkujen tehon kasvattamiseen (Luo et al., 2015). On siis todennäköistä, että akkuja voidaan tulevaisuudessa hyödyntää merkittävästi suuremmissakin energiavarastoissa.

5.3 Elinkaarikustannusten vertailu

Taulukkoon 5 on kerätty eri lähteistä energianvarastointimuotojen elinkaarikustannuksia. On huomioitava, että PHS-järjestelmillä on monissa tutkimuksissa erilaiset lähtöoletukset kuin vetypolttokennoilla ja litiumioniakuilla. PHS on monissa yhteyksissä mallinnettu vain pitkän aikavälin varastona, kun akut ja polttokennot ovat taas mallinnettuna keskipitkän aikavälin varastona. Taloudellisten lukujen vertailussa tulee ennemmin huomioida lähteen sisällä olevia eroja kuin vertailla lähteiden arvoja toisiinsa, sillä eri lähteissä tehdyt oletukset kustannusten, korkokantojen ja muiden parametrien suhteen tekevät lähteiden välisen tarkan vertailun vaikeaksi.

Taulukko 5. *varastointiteknologioiden elinkaarikustannukset kirjallisuuden perusteella.*

Kirjoittajat:	Käyttökohde:	LCCOS (€/kW-vuosi)		
		PHS	HFC	LIB
(Mostafa et al., 2020)	PHS: pitkän aikavälin, HFC ja LIB keskipitkän aikavälin	188–450	320	430
(Zakeri & Syri, 2015)	PHS pitkän aikavälin, HFC ja LIB keskipitkän aikavälin	239	385	493
(Schoenung & Hassenzahl, 2003)	Purkautumisaika 4 tuntia	~219*	~352*	~485*
(Battke et al., 2013)	Purkautumisaika 8 tuntia	-	-	460
(Kapila et al., 2017)	Purkautumisaika 8 tuntia	209–380*	-	-

**Valuutta muunnettu dollareista euroiksi*

PHS-järjestelmien vuotuiset elinkaarikustannukset ovat taulukon 5 mukaan 188-450 € per kW-vuosi. Halvimmillaan pumpattu vesivoima on siis muihin vertailun energianvarastointimuotoihin nähden selkeästi edullisin, mutta kalleimmillaan sillä ei ole samaa etua. Kustannusten vaihteluväli on suuri, sillä PHS-laitoksen kustannuksista 60 % on pääomakustannuksia (Kapila et al., 2017), jotka vaihtelevat suuresti voimalan sijainnin mukaan. Vesivoima onkin kustannusten puolesta parhaimmillaan, kun maastossa on korkeuseroja ja maaperään on helppo rakentaa vesialtaita. Pumpatun vesivoiman elinkaarikustannuksia saadaan laskettua pienentämällä purkautumisaikaa (Luo et al., 2015). Tämä toteutetaan usein rakentamalla pienempi vesiallas, mikä pienentää pääomakustannuksia merkittävästi. PHS-laitokset rakennetaankin usein mahdollisimman pieniksi siten, että energiakapasiteetti vastaa vain hieman yli asetettua tarvetta.

HFC-järjestelmien vuotuiset elinkaarikustannukset ovat taulukon 5 perusteella 320–385 € per kW-vuosi. Zakeri ja Syri (2015) määrittävät HFC järjestelmän elinkaarikustannuksiksi 385 € per kW-vuosi, mutta toteavat, että kulutuksen ja tuotannon tasaamiseen käytettävistä energianvarastointijärjestelmistä, vetypolttokennojen hinnassa on kaikkein suurin suhteellinen epävarmuus, lähes 200 € per kW-vuosi. Tämä johtuu siitä, että vetypolttokennon akuston vaihtokustannukset kasvavat suuriksi, jos polttokennoa ladataan ja puretaan todella usein (Zakeri & Syri, 2015). Vetypolttokennot sopivat siis kustannusten näkökulmasta parhaiten pitkäkestoisiin, harvemmin ladattaviin ja purettaviin käyttökohteisiin. Vetypolttokennojen hinnan arvioidaan laskevan merkittävästi seuraavien vuosien aikana vahvistaen niiden kilpailukykyä etenkin pitkän aikavälin energiavarastoissa (Schmidt et al., 2019).

Litiumioniakuilla on taulukon 5 mukaan vertailun suurimmat vuotuiset elinkaarikustannukset, 430–510 € per kW-vuosi. Taulukon 5 suurimmat kustannusarviot litiumioni akuille on kuitenkin noin 10–20 vuotta vanhoja, joten ne eivät ole relevantteja jatkuvasti kehittyvällä akkumarkkinalla. Litiumioniakuilla on pienempi suhteellinen epävarmuus kuin vetypolttokennoilla, mutta absoluuttinen epävarmuus myös litiumioniakun hinnassa on lähes 200 € per kW-vuosi (Zakeri & Syri, 2015). Battke et al. (2013) mukaan litiumioniakkujen elinkaarikustannusten epävarmuus johtuu teknologian kypsymättömyydestä ja siitä, että alalla on monia kilpailevia teknologioita, joiden kustannukset ja suorituskyky eroavat toisistaan.

5.4 Tasoitetuttujen varastoinnin kustannusten vertailu

Taulukkoon 6 on kirjattu kirjallisuuden lähteistä löytyneitä LCOS-arvoja energiavarastoille. Tässä alaluvussa tulee huomioida samat ongelmat, jotka tuotiin esille aiemmin luvussa 5.3.

Taulukko 6. *Tasoitetut varastoinnin kustannukset kirjallisuuden perusteella.*

Kirjoittaja:	Lisätiedot:	LCOS (€/MWh)		
		PHS	HFC	LIB
(Hossain et al., 2020)	Vuosi 2015	~60–130	~300–410	~150–700
(Hossain et al., 2020)	Arvio vuodelle 2030	~55–130	~120–235	~130–195
(Mostafa et al., 2020)	Vuosi 2020	156.7	442.8	611
(Jülch, 2016)	Vuosi 2016	~110	-	~335
(Jülch, 2016)	Arvio vuodelle 2030	-	~180	~225
(Rahman et al., 2023)	Vuosi 2023	-	-	~190*
(Schmidt et al., 2019)	Arvio vuodelle 2050	~143–428*	-	~86–266*

**Valuutta muunnettu dollareista euroiksi*

Vetypolttokennojen LCOS on ennen vuotta 2020 ollut melko korkea, jopa kahdeskan kertaa PHS:ää kalliimpi, mutta niiden hinnan on ennustettu laskevan merkittävästi lähitulevaisuudessa (Taulukko 6). Pienimmät arviot vetypolttokennojen tasoitetuista varastointikustannuksista mahdollistavat vetypolttokennojen kilpailullisen kustannustason saavutettavan jo vuoteen 2030 mennessä. Kuten luvussa 5.3 todettiin, vetypolttokennojen kustannukset ovat pienimmillään pidemmän varastoinnin tehtävissä. Schmidt et al. (2019) arvioi vetypolttokennojen olevan halvin kausittaiseen, eli kuukausien mittaiseen

varastointiin käytettävä teknologia jo ennen vuotta 2030. On kuitenkin todennäköistä, että vetypolttokennojen tasoitetut varastointikustannukset eivät kuitenkaan edes vuoteen 2050 mennessä pysty kilpailemaan muiden teknologioiden kanssa lyhyemmän aikavälin varastointitarkoituksissa (Schmidt et al., 2019).

Litiumioniakkujen tasoitetuista varastointikustannuksista on tällä hetkellä haastavaa antaa tarkkaa arviota, sillä markkinoille saapuu jatkuvasti uusia, hieman erilaisia akkuteknologioita, joiden hinta on vielä korkea. Litiumioniakut ovat tällä hetkellä arvioiden epätarkkuuden huomioon ottaenkin kallis ratkaisu (taulukko 6). Arvioiden mukaan litiumioniakkujen kustannukset tasoittuvat ja laskevat, kun uudet teknologiat ja toimintatavat energianvarastointiratkaisuissa vakiintuvat (Zakeri & Syri, 2015). Schmidt et al. (2019) arvioi litiumioniakkujen hinnan laskevan merkittävästi vuoteen 2050 mennessä, alittaen pumpatun vesivoiman kustannukset lyhyen aikavälin varastoissa. Arvioiden mukaan litiumioniakut tulevat olemaan moniin ratkaisuihin halvin teknologia jo vuonna 2030 ja lähes kaikkiin energianvarastointitarpeisiin halvin ratkaisu vuonna 2050, pois lukien kausittaiset pitkän aikavälin vetyvarastot sekä hyvin lyhytaikaiset nopean vasteajan vauhtipyöräratkaisut. Tähän pidetään syynä litiumioniakkujen käyttöä laajasti monilla teknologiasektoreilla, mikä nopeuttaa kyseisen teknologian kehitystä verrattuna vetypolttokennoihin ja pumpattuun vesivoimaan. Käyttö monella teknologiasektorilla on herättänyt aiheellisen huolen teknologian kypsymisestä ja kehityksen loppumisesta. (Schmidt et al., 2019) Litiumioniakkujen etulyöntiasemaa korostaa edelleen teknologian monipuolisuus. Suurimmassa osassa tutkimuksia vertailu tehdään samalla käyttöasteella, mutta todellisuudessa litiumioniakut ovat sovellettavissa useampaan käyttökohteeseen, jolloin niiden käyttöaste kasvaa ja LCOS laskee.

5.5 Teknologioille ominaiset haasteet ja riskit:

Pumpatun vesivoiman suurimmat haasteet perustuvat voimalan ja itse vesivaraston kokoon. Pumpatun vesivoiman kustannustehokas toiminta vaatii luonnollisia korkeuseroja, joten voimalan sijoituspaikka voi olla vaikea löytää. Voimaloiden rakennusprosessi kuormittaa ympäristöä, varsinkin kiviaineksen louhiminen ja betonin valmistaminen aiheuttavat merkittäviä hiilidioksidipäästöjä (Abdon et al., 2017). PHS-voimalan rakentaminen on pitkä, noin 10 vuoden mittainen operaatio, jonka aikana alueelle aiheutuu ympäristöhaittaa ekosysteemien tuhoutumisen ja päästöjen muodossa. (Chen et al., 2009). Koko rakennusprosessi kuormittaa rakennusaluetta ja sen ympäristöä myös sosiaalisesti, aiheuttaen jatkuvaa liikennettä sekä visuaalisia haittoja. Haitat PHS-voimalasta voivat olla merkittäviä myös rakennusprosessin jälkeen, sillä suuri pato tai vesivarasto voi estää luonnossa liikkumista ja tuhota näköaloja. Näköalahaittojen lisäksi korkealle varastoituna oleva suuri määrä vettä aiheuttaa merkittävän tulvariskin, jos vesiallas hajoaa tai hajotetaan.

Vetyteknologian suurimmat haasteet liittyvät poliittisiin ja lainsäädännöllisiin sekä ekologisiin ongelmiin. Tällä hetkellä Euroopassa on merkittävää epävarmuutta vetypolitiikan kehityksestä, mikä rajoittaa investointeja. Vetypolttokennojen kokonaishyötysuhde on muihin energiavarastoihin verrattuna todella huono, joten niiden käyttäminen vaatii todella paljon energiaa (Abdon et al., 2017). Jos energia ei ole täysin uusiutuvaa, voivat polttokennojen käytön lopulliset päästöt olla suuret (Abdon et al., 2017). Vetyvarastoissa on lisäksi vedyn vaikean säilömisen ja sen helpon syttymisen aiheuttama tulipalo- ja räjähdysriski, mutta vety on kevyt aine, joka leviää ja nousee ilmakehässä nopeasti. Tämä riski voidaankin suurelta osin eliminoida hyvällä ilmanvaihdolla.

Litiumioniakkujen riskit ja haitat jakautuvat poliittisiin, ekologisiin, sosiaalisiin ja teknologisiin. Poliittinen riski johtuu akkumineraalien saatavuuden epävarmuudesta, sillä suurin osa akkumineraaleista ja akuista tuotetaan Euroopan ulkopuolella (IEA, 2024b). Litiumioniakut aiheuttavat merkittäviä päästöjä louhimisprosessissa ja akuissa on myrkyllisiä aineita, jotka voivat aiheuttaa vahinkoa ympäristölle ja ihmisille (Abdon et al., 2017; Hossain et al., 2020). Litiumioniakkujen tiedetään olevan herkkiä valmistusvirheille, ylilataukselle ja -purkautumiselle, sisäisille oikosuluille ja lämmönsäätelyn virheille (Im & Chung, 2023). Edellä mainittujen tekijöiden tiedetäänkin aiheuttaneen useita tulipaloja (Im & Chung, 2023). Litiumioniakkujen tulipalot ovat vaikeita sammuttaa ja ne vapauttavat myrkyllisiä kaasuja, joten ne aiheuttavat merkittäviä riskejä ympäristön ja ihmisten turvallisuuden kannalta. Suuren mittakaavan akut voidaan kuitenkin varastoida kauas asutuksesta ja suojata ympäristöltä, joten turvallisuusriskit kohdistuvat enemmän pienempiin akkuvarastoihin, jotka sijaitsevat loppukäyttäjän välittömässä läheisyydessä.

5.6 Yhteenveto vertailusta

Pumpattu vesivoima on jo käyttöön vakiintunut ja kypsä teknologia, jonka ei enää uskota kehittyvän merkittävästi (Zakeri & Syri, 2015). PHS- järjestelmät ovat usein suuria, tuntien tai jopa vuorokausien purkautumisajalle suunniteltuja energiavarastoja (Luo et al., 2015). Pumpattu vesivoima on vasteajaltaan hidas teknologia energianvarastointiin. Tämä rajoittaa sen osallistumista reservimarkkinoille (Gür, 2018; Hossain et al., 2020). Laitosten kustannukset riippuvat suuresti maantieteellisestä sijainnista ja luonnolliset korkeuserot ovatkin mahdollistava tekijä pumpatun vesivoiman taloudellisessa kilpailukyvyssä. Jos laitoksen rakentamisen kustannukset pystytään pitämään alhaisina, pumpattu vesivoima on vielä halvin energianvarastointimuoto erityisesti pidemmän aikavälin (Schmidt et al., 2019) energiavarastoihin. On kuitenkin todennäköistä, että tulevaisuudessa muut teknologiat ohittavat pumpatun vesivoiman kustannustehokkuudessa lähes kaikissa käyttökohteissa (Schmidt et al., 2019). PHS-laitokset kuormittavat paikallista ympäristöä ja ekosysteemejä kokonsa ja pitkien rakennusprojektien takia(Abdon et al., 2017; Chen et al., 2009). Suuret vesialtaat luovat lisäksi tulvariskin voimalan lähialueille. Taulukossa 7 on koostettuna tulokset energiavarastojen vertailusta. Taulukossa värit ilmaisevat ominaisuuksien toteutumisen eri teknologioilla: punainen väri kuvastaa, että ominaisuus ei toteudu, keltainen väri kuvastaa osittaisen toteutumisen, ja vihreä väri kuvastaa, että ominaisuus toteutuu hyvin.

Vetypolttokennot ovat kehittyvä, suuria epävarmuuksia sisältävä teknologia. Epävarmuudet liittyvät hyötysuhteeseen ja käyttömahdollisuuksiin ratkaisussa, joissa energiavarastosta vapautetaan energiaa usein (Zakeri & Syri, 2015). Myös taloudellinen näkökulma on epävarma, sillä kehittyvän teknologian kustannuksia on vaikea ennustaa. Käyttötapa vaikuttaa merkittävästi vetypolttokennon korjaus ja huoltokustannuksiin, mikä edelleen lisää taloudellista epävarmuutta (Zakeri & Syri, 2015). Vedyn käyttöä koskeva säätely on vielä kehittyvässä vaiheessa, eivätkä yritykset eivät ole halukkaita tekemään suuria investointeja ennen kuin säätely on selkeä ja valmis (Moore, 2024), joten riskitaso on vielä melko korkea. Vetypolttokennot soveltuvat taloudellisesta näkökulmasta pitkän aikavälin energianvarastointiin (Schmidt et al., 2019), mutta niitä voidaan teoriassa hyödyntää myös lyhyemmän aikavälin varastoissa.

Taulukko 7. *Kooste energiavarastojen vertailusta.*

	Nykytila			Kehitysmahdollisuudet		
Ominaisuus	**PHS**	**HFC**	**LIB**	**PHS**	**HFC**	**LIB**
Sopii monipuolisesti erilaisille sähkömarkkinoille	🟥	🟨	🟩	🟨	🟨	🟩
Sopii pieniin ja suuriin käyttökohteisiin	🟨	🟨	🟨	🟨	🟩	🟩
Kustannuksiltaan edullinen	🟩	🟨	🟨	🟨	🟨	🟩
Ympäristöystävällisyys	🟨	🟩	🟨	🟨	🟩	🟨
Poliittiset ja lainsäädännölliset haasteet	🟩	🟨	🟨	🟨	🟨	🟨
Turvallisuus	🟨	🟨	🟨	🟨	🟨	🟨

Litiumioniakut sopivat erittäin nopean vasteaikansa ansiosta erityisesti lyhyen ja keskipitkän aikavälin sovelluksiin (Luo et al., 2015). Litiumioniakkujen purkautumisaika on vielä rajoittunut, parhaimmillaankin vain useita tunteja (Gür, 2018; Luo et al., 2015). Tämän ennustetaan kuitenkin muuttuvan, kun uusia akkuteknologioita kehitetään ja enemmän akkupohjaisia energiavarastoja implementoidaan sähköverkkoon. Akut ovat olleet todella kallis ratkaisu, mutta hinnat ovat laskeneet nopeasti. Jos hintakehitys jatkuu samankaltaisena, litiumioniakkujen uskotaan olevan halvin ratkaisu lähes kaikkeen energianvarastointiin vuoteen 2050 mennessä (Schmidt et al., 2019). Akkuteknologian soveltuminen muillekin teknologiasektoreille toisaalta lisää sen kehitysnopeutta, mutta on myös herättänyt epäilyksiä akkuteknologian kypsymisestä ja kehityksen hidastumisesta (Schmidt et al., 2019). Litiumioniakkujen saatavuus geopoliittisten jännitteiden takia sekä akkujen aiheuttamat tulipalot kasvattavat teknologian implementoinnin riskejä (IEA, 2024b; Im & Chung, 2023).

6. PÄÄTELMÄT

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä erilaisiin energianvarastointijärjestelmiin, joita voidaan hyödyntää suomalaisessa sähköjärjestelmässä sähkön tuotannon ja kulutuksen tukena. Kandidaatintyön tavoite syntyi uusiutuvien energiantuotantomuotojen aiheuttamasta sähkön tuotannon epävarmuudesta ja tästä syystä energianvarastoinnin jatkuvasta yleistymisestä. Työssä perusteltiin Suomen sähköjärjestelmän energianvarastointitarve, esiteltiin Suomen sähkömarkkinat sekä käsiteltiin kolmea yleistä, tai jatkuvasti yleistyvää energianvarastointimuotoa: Pumpattua vesivoimaa, Vetyvarastoja ja polttokennoja sekä litiumioniakkuja. Työssä pyrittiin vastaamaan valittujen energianvarastointimuotojen osalta kahteen tutkimuskysymykseen:

1. *Mitkä parametrit ovat tärkeimpiä energiavarastojen vertailussa ja miten valitut energianvarastointimuodot vertautuvat toisiinsa valittujen parametrien perusteella?*

2. *Miten valittuja energianvarastointimuotoja voidaan soveltaa Suomen sähköverkossa?*

Kirjallisuuden perusteella energiavarastojen vertailussa tärkeimmät parametrit liittyvät niiden toiminnallisuuteen ja kustannuksiin. Toiminnallisuuden osalta vasteaika, teho ja purkautumisaika valikoituivat tärkeimmiksi parametreiksi, sillä ne määrittävät laitoksen potentiaalisen koon ja sen, millä eri sähkömarkkinoilla energiavarasto voi toimia. Kustannuksiin liittyvistä tekijöistä on kirjallisuudessa tunnistettu elinkaarikustannukset sekä tasoitetut varastoinnin kustannukset. Elinkaarikustannukset ovat vanhempi, laajasti eri sektoreilla käytetty mittari, kun taas tasoitetut varastoinnin kustannukset ovat uudempi, erityisesti energian varastoinnissa hyödynnetty mittari. Taulukoista 5 sekä 6 voidaankin nähdä, että tasoitettuja varastoinnin kustannuksia on hyödynnetty valitussa kirjallisuudessa kustannusmittarina modernimassa 2015 vuoden jälkeen tehdyssä tutkimuksessa, kun taas elinkaarikustannukset ovat olleet tutkimuskohteena kahta poikkeusta lukuun ottamatta pääosin vuoteen 2015 asti.

On vaikeaa löytää yhtä energianvarastointijärjestelmää, joka ratkaisisi kaikki Suomen sähköjärjestelmän ongelmat. Onkin todennäköistä, että tulevaisuuden sähköjärjestelmään tullaan integroimaan laaja skaala erilaisia energiavarastoja. Niihin lukeutuu todennäköisesti sekä tässä työssä tarkasteltuja että tarkastelun ulkopuolelle jääneitä

teknologioita ja erilaisia hybridiratkaisuja. Näiden ratkaisujen tulee kyetä hyödyntämään potentiaalinsa laaja-alaisesti eri sähkömarkkinoilla ja löytää yhdistelmä erilaisia tulonlähteitä. Tutkimuksen perusteella voidaan kuitenkin ennustaa, että pumpattu vesivoima on vanha ja kypsä teknologia, jonka suosio tulee hiipumaan. Tämä johtuu laitosten koosta ja koon oheisvaikutuksista esimerkiksi ympäristöön, sekä teknologian kustannuksista, joita ei todennäköisesti pystytä juuri pienentämään. Pumpattua vesivoimaa tullaan hyödyntämään vielä vuosikymmeniä sen pitkän käyttöiän vuoksi, mutta uudet PHS-investoinnit tulevat vähenemään. Pumpattu vesivoima on erityisen haasteellinen teknologia suomalaisen sähköverkon kannalta, sillä Suomessa on vain vähän alueita, joissa on tarpeeksi korkeuseroja PHS-järjestelmän hyödyntämiseen. Pumpatun vesivoiman rooli ainoana laajasti käytössä olevana energiavarastona tulee häviämään ja erityisesti pienemmän mittakaavan varastointitarpeet tullaan todennäköisesti toteuttamaan hyödyntäen akkuja.

Litiumioniakkujen rooli energianvarastoinnissa on kasvanut jatkuvasti ja tämä kasvu tulee todennäköisesti jatkumaan. Litiumioniakkujen monipuolinen käyttö eri teknologiasektoreilla on johtanut niiden hinnan jatkuvaan laskemiseen ja akkujen tekniseen kehitykseen. Akkujen käyttöä voivat rajoittaa teknologisen kehittymisen loppuminen, turvallisuushaasteet sekä poliittista syistä johtuvat saatavuusongelmat. Suomessa ei ole samankaltaisia erityisiä rajoitteita akkujen hyödyntämiselle kuin pumpatun vesivoiman osalta. Akkujen pääasialliset hyödyntämiskohteet ovat pienet ja keskisuuret energiavarastot, eli niitä voidaan hyödyntää tuotannon ja kulutuksen tukemisen lisäksi sähkön reservimarkkinoilla.

On arvioitu, etteivät akut sovellu suuriin, pitkän aikavälin energiavarastoihin. Näihin käyttötarkoituksiin tullaan hyödyntämään vielä pitkään pumpattua vesivoimaa, mutta sen suosion laskiessa jatkuvasti kehittyvät vetyvarastot tulevat todennäköisesti kasvattamaan suosiotaan. Suomessa vetyvarastojen roolin voidaan olettaa kasvavan, sillä koko Euroopassa on sekavasta politiikasta ja lainsäädännöstä riippumatta suuret suunnitelmat vetyteknologialle ja sen laajamittaiselle hyödyntämiselle. Vetyvarastot ovat parhaillaan todella ympäristöystävällinen ja kustannuksiltaan kohtalainen energiavarasto, mutta vääriin käyttökohteisiin hyödynnettynä sen päästöt voivat kasvavaa suuriksi ja kustannukset korkeiksi. Suomen toimintaympäristö ei rajoita vetyvarastojen käyttöä ja eurooppalaiseen toimintaympäristöön kuuluminen todennäköisesti edesauttaa sitä.

Tulososio vastasi erityisesti ensimmäiseen tutkimuskysymykseen kattavasti. Toiseen tutkimuskysymykseen vastaaminen oli haastavaa, sillä tekniset ja taloudelliset aspektit ovat lähtökohtaisesti yleistettävissä globaalisti, ja ero Suomen sekä muun maailman välillä oli tästä syystä haastava luoda. Tulososion alaluvun 5.5 ”Haasteet ja riskit” avulla kuitenkin pystyttiin luomaan jakoa suomalaisen ja globaalin toimintaympäristön välille. Lisäksi suomalaisten sähkömarkkinoiden esittelyn avulla saatiin luotua yhteys energiavarastojen ja Suomen sähköjärjestelmän välille.

On tärkeää huomata, ettei tämä työ ole täysin holistinen katsaus energianvarastoihin ja niiden vertailuun. Tämä johtuu rajauksesta sekä energianvarastointiteknologioiden, että parametrien osalta. Kuvassa 2 esiteltiinkin useita energianvarastointiteknologioita, joihin ei tässä työssä keskitytty. Myös työssä hyödynnetyt parametrit jouduttiin rajaamaan suuresta joukosta, jota kirjallisuudessa esitetään (ks. Gür, 2018; Hossain et al., 2020; Luo et al., 2015). Rajaus oli kuitenkin välttämätön tehdä kandidaatintyön rajoitetun laajuuden takia.

Kirjallisuuskatsauksen tuloksia kohtaan tulee olla kriittinen, sillä helmenkasvatusmenetelmän vahva hyödyntäminen voi luoda vahvistusharhoja tai aiheuttaa näkökulman ankkurointia. Nämä voivat vääristää tuloksia todellisesta tilanteesta. Työn aihepiirit keskittyvät kuitenkin suurelta osin objektiiviseen dataan, joka on kerätty luotettavista ja vertaisarvioiduista julkaisuista. Vertaisarvioitujen julkaisujen JUFO- luokituksen keskiarvo on 2.2 ja se indikoi, että lähdemateriaali on luotettavaa. Tutkimuksessa hyödynnettiin kolmea vertaisarvioimatonta julkaisua, mutta ne olivat Yhdysvaltain energiaministeriön julkaisemia ja niitä voidaan pitää luotettavana

Kirjallisuuskatsauksen aikana huomattiin joitakin puutteita aihealueen kirjallisuudessa. Taloudellisten lukujen vertailu aihealueen tutkimuksessa on epäselkeää, sillä taloudellisten lukujen laskemisessa käytetään erilaisia lähtöoletuksia ja laskukaavoja. Tästä syystä taloudellisia lukuja ei vertailtu eri lähteiden välillä, vaan pyrittiin löytämään lähteiden sisäisiä tietoja ja esimerkiksi halvin / kallein -suhteita. Yhtenäistettyjen määritelmien ja laskumallien kehittäminen mahdollistaisi objektiivisemman vertailun eri lähteiden välillä, ja se onkin yksi tärkeistä aiheista jatkotutkimukselle. Valitussa kirjallisuudessa ”Haasteet ja riskit” osion osalta ekologisia näkökulmia on tutkittu lähinnä hiilidioksidipäästöjen kannalta, ja muita osa-alueita, eli poliittisia, lainsäädännöllisiä ja sosiaalisia näkökulmia on käsitelty todella rajallisesti, joten jatkotutkimus painottuen näihin näkökulmiin on tärkeää. Alan tutkimus on melko rajoittunut yksittäisten teknologioiden hyödyntämiseen ja erilaisten hybridijärjestelmien vertailu onkin tärkeä aihe jatkotutkimukselle.

Tämä työ voi olla merkityksellinen energiasektorin yrityksille, päättäjille, tutkijoille ja opiskelijoille. Yrityksille ja päättäjille tämä työ antaa selkeän katsauksen energian varastoinnin nykytilaan ja mahdolliseen kehityssuuntaan. Tutkijoille ja opiskelijoille on tässä työssä edellä mainitun lisäksi perusteltu nykytutkimuksen heikkouksia sekä ehdotettu mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Vaikka työn painopiste oli Suomen sähköjärjestelmässä, ovat tutkimuksen tulokset pääosin sovellettavissa globaalisti, sillä energiavarastojen tekniset ja taloudelliset näkökulmat eivät juuri muutu maantieteellisen sijainnin perusteella. Taloudellinen näkökulma voi kuitenkin jokseenkin muuttua, jos tuloksia pyritään hyödyntämään alueella, jonka sähköverkkoa tarvitsee päivittää merkittäväsi energiavarastojen implementointia varten.

LÄHTEET

Abdon, A., Zhang, X., Parra, D., Patel, M. K., Bauer, C., & Worlitschek, J. (2017). Techno-economic and environmental assessment of stationary electricity storage technologies for different time scales. *Energy*, *139*, 1173–1187. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.097

Battke, B., Schmidt, T. S., Grosspietsch, D., & Hoffmann, V. H. (2013). A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *25*, 240–250. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.023

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, *19*(3), 291–312. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014

Crompton, T. P. J. (2000). *Battery Reference Book (3rd Edition)*. Elsevier. https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBRBE0001/battery-reference-book/battery-reference-book

Energiateollisuus. (2024). *Tuulivoima*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.9.2024): https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/tuulivoima/

Energiavirasto. (2023, November 30). *Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2023*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.9.2024): https://energiavirasto.fi/documents/11120570/13026619/S%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuus+vuonna+2023.pdf/74a1194f-91cb-d28b-06bb-d5df663b06e 1/S%C3%A4hk%C3%B6n+toimitusvarmuus+vuonna+2023.pdf?t=1701326930 016

Energiavirasto. (2024). *Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti nousi 1000 megawattiin*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.9.2024): https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-tuotantokapasiteetti-nousi-1000-megawattiin

Fingrid. (2017). *Reservituotteet ja reservien markkinapaikat*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 28.10.2024): https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/

Fingrid. (2022). Aurinko- ja tuulivoiman suuri osuus vaatii toimia verkon stabiiliuden varmistamiseksi. Fingrid-Lehti. Saatavissa (viitattu 22.10.2024): https://www.fingrid-lehti.fi/aurinko-ja-tuulivoiman-suuri-osuus-vaatii-toimia-verkon-stabiiliuden-varmistamiseksi/

Fingrid. (2024). *Sähkön tuotanto ja kulutus*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.9.2024): https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/

Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: Challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*, *11*(10), 2696–2767. https://doi.org/10.1039/C8EE01419A

Hossain, E., Faruque, H. M. R., Sunny, Md. S. H., Mohammad, N., & Nawar, N. (2020). A comprehensive review on energy storage systems: Types, comparison, current scenario, applications, barriers, and potential solutions, policies, and future prospects. *Energies*, *13*(14). Scopus. https://doi.org/10.3390/en13143651

IEA. (2017). *Tracking Clean Energy Progress 2017*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.11.2024): https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/05/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf

IEA. (2024a). *Global installed energy storage capacity by scenario, 2023 and 2030 – Charts – Data & Statistics*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.9.2024): https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-installed-energy-storage-capacity-by-scenario-2023-and-2030

IEA. (2024b). *Batteries and Secure Energy Transitions*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 26.9.2024): https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions

Im, D.-H., & Chung, J.-B. (2023). Social construction of fire accidents in battery energy storage systems in Korea. *Journal of Energy Storage*, *71*, 108192. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108192

Jülch, V. (2016). Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method. *Applied Energy*, *183*, 1594–1606. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.165

Kapila, S., Oni, A. O., & Kumar, A. (2017). The development of techno-economic models for large-scale energy storage systems. *Energy*, *140*, 656–672. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.117

Koivunen, T., Syri, S., & Veijalainen, N. (2022). Contributing factors for electricity storage in a carbon-free power system. *International Journal of Energy Research*, *46*(2), 1339–1360. https://doi.org/10.1002/er.7252

Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, *27*, 101047. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047

Liu, J., Hu, C., Kimber, A., & Wang, Z. (2020). Uses, Cost-Benefit Analysis, and Markets of Energy Storage Systems for Electric Grid Applications. *Journal of Energy Storage*, *32*, 101731. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101731

Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, *137*, 511–536. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081

Moore, M. (2024, June 12). Why hydrogen infrastructure ambition is a long way from reality. *Financial Times*. Saatavissa (viitattu 2.12.2024): https://www.ft.com/content/0a365a66-9eb0-47da-aa07-bbc1fefd7914

Mostafa, M. H., Abdel Aleem, S. H. E., Ali, S. G., Ali, Z. M., & Abdelaziz, A. Y. (2020). Techno-economic assessment of energy storage systems using annualized life cycle cost of storage (LCCOS) and levelized cost of energy (LCOE) metrics. *Journal of Energy Storage*, *29*, 101345. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101345

Partanen, J., Viljainen, S., Lassila, J., Honkapuro, S., Salovaara, K., Niemelä, H., Annala, S., Makkonen, M., Belonogova, N., & Sihvonen, V. (2021). *Electricity Markets – Lecture Notes*.

Rahman, M. M., Gemechu, E., Oni, A. O., & Kumar, A. (2023). The development of a techno-economic model for assessment of cost of energy storage for vehicle-to-

grid applications in a cold climate. *Energy*, *262*, 125398. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125398

Rohit, A. K., Devi, Ksh. P., & Rangnekar, S. (2017). An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector: Part I – Technologies and Comparison. *Journal of Energy Storage*, *13*, 10–23. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.06.005

Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. *Joule*, *3*(1), 81–100. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008

Schoenung, S. (2001). *Characteristics and Technologies for Long- vs. Short-Term Energy Storage: A Study by the DOE Energy Storage Systems Program* (Nos. SAND2001-0765, 780306; pp. SAND2001-0765, 780306). https://doi.org/10.2172/780306

Schoenung, S., & Hassenzahl, W. (2003). *Long- vs. short-term energy storage technologies analysis: A life-cycle cost study : a study for the DOE energy storage systems program.* (Nos. SAND2003-2783, 918358; pp. SAND2003-2783, 918358). https://doi.org/10.2172/918358

Steward, D., Saur, G., Penev, M., & Ramsden, T. (2009). Lifecycle Cost Analysis of Hydrogen Versus Other Technologies for Electrical Energy Storage. *Technical Report*. https://www.osti.gov/biblio/968186

Tilastokeskus. (2023). *Sähkön tuotanto tuulivoimalla ja ydinvoimalla nousivat vuonna 2022.* Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 21.9.2024): https://stat.fi/julkaisu/cl8mo29omxf8t0dukky5aa8i1

Tilastokeskus. (2024). *Kotimaisella sähkön tuotannolla katettiin 98 % Suomen sähkön tarpeesta vuonna 2023.* Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 22.10.2024): https://stat.fi/julkaisu/cln2zc9wg8fgb0cut7vm9hil8

Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 569–596. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011

Zsiborács, H., Baranyai, N. H., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., & Pintér, G. (2019). Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040. *Electronics*, *8*(7), Article 7. https://doi.org/10.3390/electronics8070729

7. LIITTEET

Liite 1: Tutkimuksessa hyödynnetyt artikkelit sekä niiden julkaisualusta ja JUFO- luokitus.

Kirjoittaja	Julkaisualusta	JUFO
Jülch, V. (2016).	Applied Energy	3
Luo, X., et al. (2015).	Applied Energy	3
Trivedi, A., et al. (2020).	Applied Energy	3
Abdon, A., et al. (2017).	Energy	3
Kapila, S., et al. (2017).	Energy	3
Rahman, M. M., et al. (2023).	Energy	3
Gür, T. M. (2018).	Energy & Environmental Science	3
Schmidt, O., et al. (2019).	Joule	3
Im, D.-H., & Chung, J.-B. (2023).	Journal of Energy Storage	2
Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020).	Journal of Energy Storage	2
Liu, J., et al. (2020).	Journal of Energy Storage	2
Mostafa, M. H., et al. (2020).	Journal of Energy Storage	2
Mugyema, M., et al. (2023).	Journal of Energy Storage	2
Rohit, A. K., et al. (2017).	Journal of Energy Storage	2
Battke, B., et al. (2013).	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2
Zakeri, B., & Syri, S. (2015).	Renewable and Sustainable Energy Reviews	2
Zsiborács, H., et al. (2019).	Electronics	1
Hossain, E., et al. (2020).	Energies	1
Koivunen, T., et al. (2022).	International Journal of Energy Research	1
Chen, H., et al. (2009).	Progress in Natural Science	1*
Schoenung, S. (2001).	U.S. Department of Energy	-
Schoenung, S., & Hassenzahl, W. (2003).	U.S. Department of Energy	-
Steward, D., et al. (2009).	U.S. Department of Energy	-