

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

ENERGIAVARASTOT

Energy Storage

Työn tarkastaja: Markku Nikku

Työn ohjaaja: Markku Nikku

Lappeenranta 20.1.2020

Krenare Berilaj

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Krenare Berilaj

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Markku Nikku

Kandidaatintyö 2020

33 sivua, 6 kuvaa ja 9 taulukkoa

Hakusanat: energiavarasto, lämpövarasto, sähkövarasto, sähköenergia ja lämpöenergia.

Kandityön tarkoituksena on perehtyä erilaisiin energia varastointimenetelmiin ja selvittää minkälaisia teknologioita käytetään energian varastointiin.

Kirjallisuustyössä keskityttiin ensisijaisesti yleisimpiin energiavarastoihin, joita käytetään ja niiden esittelemiseen yleisellä tasolla. Kirjalähteitä käytettiin energia varastointimenetelmien ja teknologioiden yleisten toimintaperiaatteiden selvittämiseen. Internetlähteitä käytettiin apuna uusimman tiedon hankinnassa ja projektien haussa.

Energiavarastojen avulla pystytään tehokkaasti tasaamaan vuodenaikojen välisiä energian tarpeita kysynnän ja tarjonnan suhteen, etenkin Pohjoismaissa. Energiavarastojen sovelluksien nopeaa määrällistä kasvua hidastaa niiden korkeat käyttöönottokustannukset. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että kiinnostus energiavarastoja kohtaan kasvaa jatkuvasti ja uusia projekteja suunnitellaan ympäri maailmaa tälläkin hetkellä.

Sähkövarastot jaetaan niiden toimintaperiaatteen mukaan sähkökemiallisiin, mekaanisiin kemiallisiin ja sähköisiin. Työssä esitellään lyhyesti magneettiset systeemit, akut, paineilmaparastot, pumppuvoimalaitokset, vauhtipyörä, vetyvarasto sekä superkondensaattorit. Lämmön varastointi perustuu tuntevan lämmön varastointiin, latenttilämmön varastointiin tai termokemialliseen varastointiin. Työssä esitellään nämä kolme varastointiteknologiaa sekä niihin käytettäviä materiaaleja.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Sähkövarastot	7
2.1 Magneettinen systeemi	7
2.2 Akut	9
2.3 Paineilmavarastot	10
2.4 Pumppuvoimalaitokset	11
2.5 Vauhtipyörä	12
2.6 Vetyvarasto	13
2.7 Superkondensaattorit	14
3 Lämpövarastot	16
3.1 Tuntuva lämmön varastointi	18
3.2 Latentin lämpöenergian varastointi	19
3.3 Termokemiallinen lämmön varastointi	21
4 Varastointikustannukset	23
4.1 Sähkövarastojen investointikustannukset	24
4.2 Lämpövarastojen investointikustannukset	26
5 Tulevaisuuden näkymät	30
6 Yhteenveto	32
Lähdeluettelo	34

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg]
d	etäisyys	[m]
E	energiatiheys	[MWh/m ³]
L	ominaishöyrystymis/sulamislämpö	[kJ/kg]
m	massa	[kg]
Q	lämpöteho	[W]
q	lämpövuoto	[W/m ²]
q_m	massavirta	[kg/s]
T	lämpötila	[T]
U	lämmönläpäisykerroin	[W/m ² K]

Kreikkalaiset aakkoset

Δ	muutos	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
λ	lämmönjohtavuus	[W/mK]

Lyhenteet

CAES	Paineilmavarasto, Compressed Air Energy Storage
PSH	Pumppuvoimalaitos, Pumped Storage Hydropower
SMES	Suprajohtava magneettisen energian varasto, Superconducting Magnetic Energy Storage
VRE	Satunnaisesti vaihteleva uusiutuva energia, Variable Renewable Energy

1 JOHDANTO

Nykymaailmassa energian tarve näyttää jatkuvasti kasvavan. Sekä kotitaloudet että teollisuus vaativat päivä päivältä enemmän energiaa. Samaan aikaan olemassa olevat energiantuotantomenetelmät kohtaavat jatkuvasti uusia ongelmia. Kansainvälisten sopimusten tavoitteena on rajoittaa päästöjen tasoa. Ilmaston lämpeneminen kehottaa vähentämään kasvihuonekaasuja ja useat maat ovat päättäneetkin poistaa käytöstä fossiilisia polttoaineita ja ydinvoimalaitoksia sekä panostaa uusiutuviin tuotantomenetelmiin. Lisäksi energian kysynnän ennennäkemätön kasvu maailmassa on aiheuttanut, että perinteisten energialähteiden hinta on noussut dramaattisesti ja että kansallisten talouksien riippuvuus tällaisten lähteiden jatkuvasta tarjonnasta on tullut kriittinen. Tämä on johtanut tarpeeseen kehittää tehokkaita ja kestäviä menetelmiä energian varastointiin.

Uusiutuvat energialähteet, kuten auringon säteily, valtameren aallot ja tuuli ovat olleet tärkeässä roolissa energiatuotannossa, jossa yritetään ylläpitää luonnon tasapainoa, mutta samalla vastata kasvavan väestön energiatarpeeseen. (Twidell, J.; Weir, T. 2015) Kuitenkin johtuen siitä, että ilmasto ja sää vaihtelevat, tämän tyyppisten tuotannolla saaman energian varastoinnille on tullut kiireellisiksi. Koska nämä energialähteet perustuvat suoraan luonnonvoiman hyödyntämiseen, tuotettava teho vaihtelee sään mukaan. Ongelmana tietysti on, että energian tuotto ei vastaa aina kysyntään. Saadaksemme näistä energiantuotantotavoista täysin luotettavia, energian varastointi on ratkaiseva tekijä. Energiavarastojen avulla energiaa voidaan siis varastoida korkean tuotantotehon ja matalan kysynnän aikana, ja purkaa kun tuotantoteho on alhainen ja kysyntä korkea. Energiavarastot lisäävät energiajärjestelmien joustavuutta, sillä toimivat puskurina myös tuotanto ja jakeluhäiriöissä. Häiriötilanteissa varastoiden avulla on enemmän aikaa häiriöiden korjaamiseen, ennen kuin ne vaikuttavat kuluttajiin. Energian varastointitekniikat ovat siis olennainen ja melko välttämätön osa luotettavaa ja tehokasta uusiutuvaa energiatuotantoa. (Iten, M.; Liu, S.; Shukla, A. 2016)

Energiaa voidaan varastoida joko sähköenergiana tai lämpöenergiana. Sähköenergian varastointi toteutetaan eri laitteilla tai järjestelyillä, jossa tuotettu energia varastoidaan ja vapautetaan myöhemmin käyttöön. Lämpöenergian varastointi on tekniikka, joka varastoi lämpöenergiaa lämmittämällä tai jäähdyttämällä varastoväliainetta siten, että varastoitua energiaa voidaan käyttää myöhemmin lämmitys- ja jäähdytyssovelluksiin. Edut energiavarastojen käyttäminen energiajärjestelmissä ovat hyötysuhteen parantaminen ja saatavuuden varmistaminen, joka johtaa parempaan talouteen, vähentää investointeja ja muuttuvia kustannuksia sekä vähentää ilmaston saastumista. (Dincer, I.; Rosen, M.A. 2011)

Tämä kandidaatin tutkinnon lopputyö on kirjallisuusselvitys energian varastoinnista. Työn tavoitteena on perehtyä eri energiavarastoihin, joita käytetään ja niiden toimintaperiaatteisiin. Työssä ei keskitytä tiettyyn varastointitekniikkaan vaan käsitellään yleisimmät varastointitekniikat ja materiaalit, jolla on pyritty rakentamaan mahdollisimman kattava kokonaiskuva. Energiavarastoja tarkastellaan myös kustannuksien avulla sekä esitellään myös tulevaisuudennäkymät.

Työ koostuu kuudesta luvusta. Johdannon jälkeen käsitellään eri sähkö varastointi menetelmiin. Kolmannessa osiossa käsitellään eri lämpövarastoinnin menetelmiin. Neljännessä osiossa perehdytään varastoiden kustannuksiin, jonka jälkeen esitellään varastoiden tulevaisuudennäkymät. Viimeisessä osiossa esitetään lyhyt kertaus työn sisällöstä ja aiheeseen liittyviä johtopäätöksiä.

2 SÄHKÖVARASTOT

Tässä luvussa esitellään lyhyesti sähkön varastointiin käytettyjä teknologioita. Varastointitekniikat voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen mukaan sähkökemiallisiin, mekaanisiin kemiallisiin ja sähköisiin. Paineilmavarasto (CAES), pumppuvoimalaitos (PSH) ja vauhtipyörä kuuluvat mekaanisiin. Akut kuuluvat sähkökemiallisiin varastoihin ja vetyvarastot taas kemiallisiin. Sähköiset varastotekniikat ovat suprajohtavan magneettisen energian varasto (SMES) ja superkondensaattorit.

Energian varastointimenetelmää valittaessa on syytä ottaa huomioon muutamia asioita. Näitä asioita ovat: 1) käytettävissä olevat energiareсурssit 2) energiantarve ja käyttösovellukset 3) energian varastoinnin tehokkuus 4) energian varastoinnin kulut 5) energian varastoinnin infrastruktuuri sekä mahdolliset muut tekijät. (A.G. Olabi, 2017)

2.1 Magneettinen systeemi

Energian varastointitarkoitukseen on kehitetty suprajohtavat magneettisen energian varastot eli SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) systeemit. Nimensä mukaisesti SMES-systeemit vaativat suprajohteen ja yksi niiden suurimmista haasteista onkin suprajohteen jäädyttäminen. Suprajohteiden toiminta perustuu niiden kylmentämiseen kriittisen lämpötilan alapuolelle, jolloin niiden resistanssi pienenee käytännössä nolnaan. SMES-järjestelmien onneksi on löydetty materiaaleja, jotka tulevat suprajohtaviksi jo alle 108 K:n (-162,5 °C). Tämä mahdollistaa uusien sovellusten kehittämistä entistä pidemmälle. Tällainen materiaali on esim. vismuttiperusteinen kuparioksidikeraami. (Alanen, 2003)

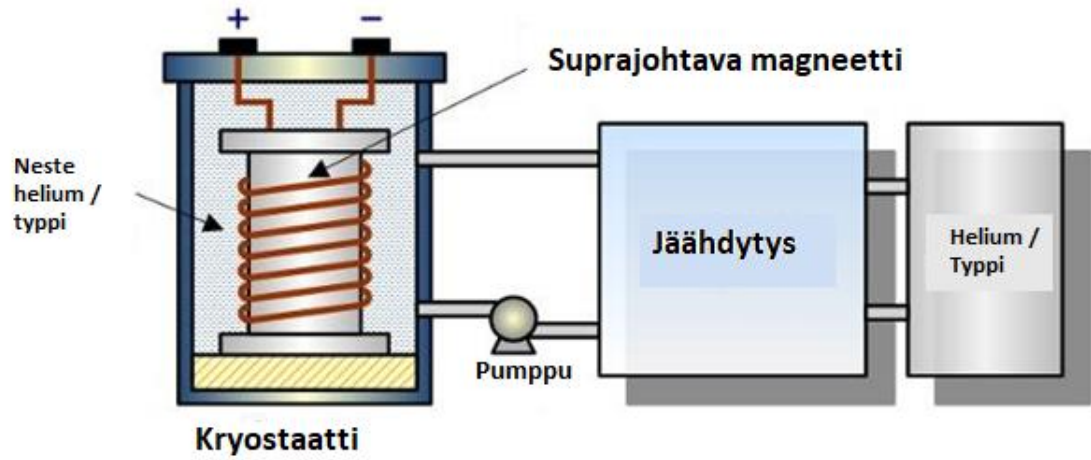
Tyypilliset SMES-systeemit koostuvat pääasiassa neljästä pääkomponentista: 1.SCM (Suprajohtava käämi, magneetti ja suojauspiiri) 2.PCS (Muuntaja, invertteri ja laukaisupiiri) 3.CS (Jäädyttimet, tyhjiöpumppu ja heliumsäiliö) 4.CU (Digitaalinen signaaliprosessori tai mikrokontrolleri ja sovitinpiiri).

SMES-systeemi varastoi energiaa magneettikenttään, jonka luo kryogeenisesti jäädytetyssä suprajohtavassa käämissä virtaava tasavirtavuo. Suprajohtavia magneettisia energiavarastoja voidaan käyttää sähköverkossa eripituisten häiriöiden ja vaihteluiden tasoittamiseen kuten sähkön laadun ylläpitämiseen ja taajuuden säätelyyn. Suurimpia SMES-järjestelmiä voidaan käyttää tasapainottamaan energian tuotantoa ja kulutusta vuorokausitasolla. (Tixador, 2008)

SMES-järjestelmän magneettikenttään varastoitunut maksimienergia:

$$E_{max} = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1)$$

jossa L on suprajohtavan magneetikäämin induktanssi ja I virta.



Kuva 1. Yksinkertainen havainne kuva suprajohtavasta magneetista ja sen jäähdytysjärjestelmästä.
(Barbour, 2014)

2.2 Akut

Yleisin ja tunnetuin tapa varastoida sähköenergiaa on sen varastoiminen akkuihin. Akut ovat uudelleen ladattavia energiavarastoja joihin energia on säilötty kemialliseen muotoon. Erilaisia akkutyyppejä on monia, joista yleisimpiä tällä hetkellä ovat lyijyakut ja litiumioniakut. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 307.) Taulukossa 1 on raportissa käsiteltävien akkutyypin ominaisuuksia.

Taulukko 1. Akkutyypin ominaisuuksia. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart, 2013, 317)

Akku	Teho P	Purkausaika	Hyötysuhde (%)	Käyttöikä
Lyijy-	3-20 MW	10s - joitakin tunteja	75-80	4-8 vuotta
Sinkki-ilma-	20 kW - 10 MW	3-4 tuntia	40-60	Muutama sata latausta
Natrium-rikki-	35 MW	8 tuntia	80-85	15 vuotta
Vanadium-redox-	4 MW	4-8 tuntia	75-80	10 vuotta
Litiumioni-	5 MW	15 min - joitakin tunteja	90 %	15 vuotta

Lyijyaku on vanhimpia akkutyyppejä. Niitä käytetään muun muassa autoissa ja UPS- laitteissa (Uninterruptible Power Supply) joilla varmistetaan sähkölaitteen tauoton virransaanti esimerkiksi sähkökatkon aikana. Lyijyakut ovat edullisia valmistaa, mutta niiden käyttöikä ja hyötysuhde ovat huonot verrattuna muihin saman teholuokan akkuihin. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309-317.)

Metalli-ilma-akuista käytetyimpiä on sinkki-ilma-akut. Ne ovat ympäristöystävällisempiä kuin tavalliset akut. Toisaalta hyötysuhde on huono ja käyttöikä todella lyhyt. Sinkki-ilma- akun anodina toimii nimen mukaisesti sinkki, muissa metalli-ilma-akuissa jokin muu halpa

metalli kuten alumiini. Katodi on joko huokoista hiiltä tai katalyytillä päällystettyä metalliverkkoa. Elektrolyytti on usein nestemäisessä muodossa. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309-317.)

Natrium-rikki-akussa keraaminen beta-alumiinielektrolyytti erottaa positiivisella elektrodilla olevan nestemäisen rikin ja negatiivisella elektrodilla sula natrium. Ne ovat tehokkaita ja hyötysuhde on hyvä. Myös käyttöikä on pitkä. Toisaalta ne ovat kalliita valmistaa ja herkästi reagoiva natrium voi olla vaarallista. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309-317.)

Vanadium-redox akut ovat markkinoilla olevista virtausakuista kaikkein kehittyneimpiä. Ne säilyttävät hyvän hyötysuhteen riippumatta lataus kerroista, mikä on vanadium-redox akkujen isoin etu. Energiatiheys sen sijaan on matala. Vanadium-redox akut soveltuvat hyvin energian säilömiseen sähköverkossa. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309-317.)

Litiumioniakussa on metallioksidi katodi ja litium-grafiitti anodista. Elektrolyyttinä toimii orgaaninen neste, johon on liuotettu litiumsuolaa. Akun latautuessa katodilla olevat litium atomit ionisoituvat ja siirtyvät anodille. Irralliset elektronit kulkevat anodille ulkoista piiriä pitkin. Anodilla litiumionit yhdistyvät irrallisten elektronien kanssa. Purkautuessa tapahtuu päinvastainen reaktio ja elektronit aiheuttavat sähkövirran kulkiessaan katodille ulkoista piiriä pitkin. Litiumioniakun etuja ovat todella hyvä hyötysuhde, korkea energiatiheys ja pitkä elinikä. Niissä ei myöskään ole muisti-ilmiötä eli akun kapasiteetti ei kärsi, vaikka sitä ladattaisiin ennen kuin se on täysin tyhjä. Käyttökohteina on muun muassa mobiililaitteet. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309-317.)

2.3 Paineilmavarastot

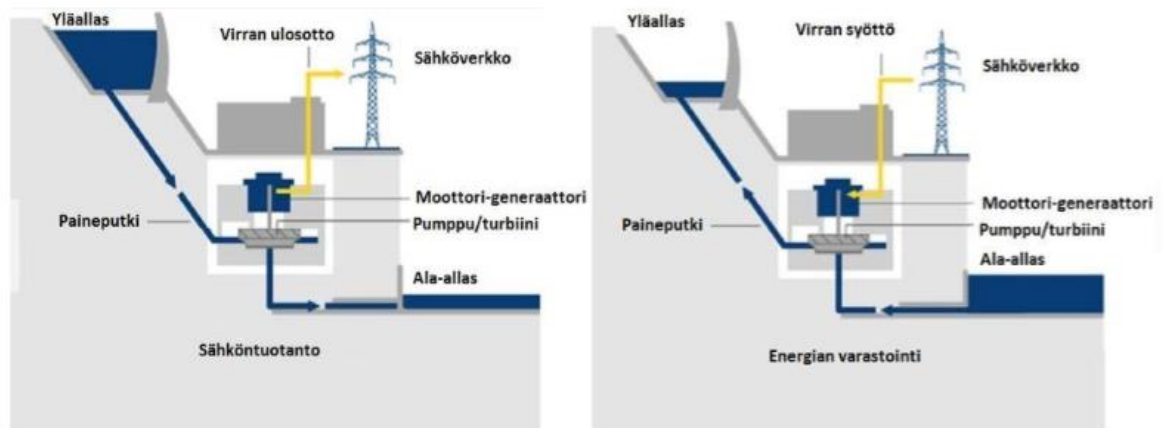
Paineilmavarastosta käytetään lyhennettä CAES, joka tulee sanoista *Compressed Air Energy Storage*. Energiaa varastoidaan siten, että ilmaa puristetaan kompressorilla mekaanisesti ja paineistettu ilma pumpataan varastoon. Edullisin vaihtoehto on käyttää varastona vanhaa kaivosta, suolakivi tai -vesi esiintymiä, mutta on myös mahdollista rakentaa maan päälle metallinen säiliö. Lisäksi tarvitaan kompressorin lisäksi moottori, jotka puristavat ilman säiliöönsä oikeaan paineeseen. Kun sähkön tarve ja hinta ovat taas kovemmat, niin ilma vapautetaan varastosta, jolloin se virtaa

sähkögeneraattoria pyörittävän turbiinin läpi. Kun ilma virtaa turbiinin läpi, sitä lämmitetään kaasulla, jolloin se laajenee ja pyörittää turbiinia tehokkaasti. (IEA, 2009)

Maailmassa on tällä hetkellä kaksi suuren mittakaavan paineilmaparastoa, jotka sijaitsevat Saksassa (290 MW) ja Yhdysvalloissa (110 MW). Maailmalla on rakenteilla lisää paineilmaparastoja ja Suomeenkin oli suunnitteilla yksi 35 MW laitos Pyhäsalmen sinkkikaivokseen, mutta hanke kaatui riittämättömiin taloudellisiin perusteisiin. (Alanen, 2003)

2.4 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoilaitoksen (PSH eli *Pumped Storage Hydropower*) toiminta perustuu kahden vesialtaan korkeuseroon ja energian varastoinnin potentiaalienergiana. Pumppuvoimalaitoksissa on vesiturbiini, joka on vesivoimalan sydän eli energiaa tuottava yksikkö. Energiantuotto perustuu kahden eri vesitason väliseen korkeuseroon. Pumppuvoimalassa vesi pumpataan takaisin alhaalta ylävesialtaaseen sähkön hinnan ollessa mahdollisimman alhaalla, jotta saadaan maksimoitua hyötyä. Kun sähkön hinta nousee, lasketaan vettä turbiinin läpi (Kuva 2). (Laatikainen, 2016). Pumppuvoimalan rakennetussa ylävesialtaassa varastointikapasiteetti on noin vuorokauden verran, kun taas luonnollisten vesialtaiden kapasiteetti liikkuu 1-2 vuoden välillä. Luonnollisesti korkeammalla altaassa seisova vesi omaa potentiaalienergiaa, joka laskettaessa padon läpi muuttuu liike-energiaksi. Vesi ohjataan turbiinin läpi, joka generaattorin avulla muuntaa siivekkeiden pyörimisenergian sähköksi. Hyvänä esimerkkinä toimii Suomessakin pääasiassa toimivat patolaitokset, joissa laitoksen yläpuolella oleva vesi varastoidaan ylävesialtaaseen. Tässä tapauksessa voimala on rakennettu paikkaan, jossa vesi kerääntyy ja varastoituu itsestään ylävesialtaaseen potentiaalienergiana. Pumppuvoimalaitoksia on kahta eri tyyppiä: vesipumppuvoimalaitos ja ilmapumppuvoimalaitos. Vesipumppulaitos on maailmalla huomattavasti yleisempi. Kaikissa pumppuvoimalaitoksissa mekaaninen energia muutetaan aina sähköksi, mutta turbiinien koko ja käytössä olevat maaston korkeuserot määräävät loppujen lopuksi voimalan suuruuden. (Laari, 2006)



Kuva 2. Pumppuvoimalaitoksen toiminta. (Niskanen, 2014)

2.5 Vauhtipyörä

Vauhtipyörään on mahdollista varastoida esimerkiksi sähköä liike-energiaksi. Energiaa voidaan varastoida lukuisia kertoja vauhtipyörään, sillä se ei kulu yhtä nopeasti kuten akut. Vauhtipyörään kohdistuvan kitkan takia, alkaa siihen sitoutunut energia välittömästi muuttamaan muotoaan lämpöenergiaksi, eli hyödynnettävissä oleva kineettinen energia vähenee ajan myötä. Vauhtipyörän toimintaan ja hyötysuhteeseen vaikuttaa olennaisesti pyörän muoto, materiaali sekä laakerointi.

Perinteinen vauhtipyörä on teräskiekko, mutta nykyaikaiset suuremmat vauhtipyörät ovat usein valmistettu komposiittimateriaaleista. Kuvassa 3 on esitetty vauhtipyöräjärjestelmän rakenne. Komposiittimateriaaleista tai niiden yhdistelmistä valmistetut vauhtipyörät ovat kevyempiä kuin perinteiset teräksiset, sekä ne pystyvät varastoimaan energiaa tehokkaammin.



Kuva 3. Vauhtipyöräjärjestelmän rakenne. (Flywheel Energy Storage. 2013)

Häviöiden pienentämiseksi voidaan nykypäivänä käyttää esimerkiksi magneettisia laakereita ja tyhjiön muodostamista vauhtipyörän ympärille. Vauhtipyörien häviöt ovat silti noin 50-100 kertaa suuremmat kuin superkondensaattoreilla tai lyijyakuilla, mutta SMES- järjestelmiin verrattuna häviöt ovat noin 10-30 kertaa pienemmät. (Alanen, 2003)

Vauhtipyöriin sitoutunut energia on laskettavissa kaavalla:

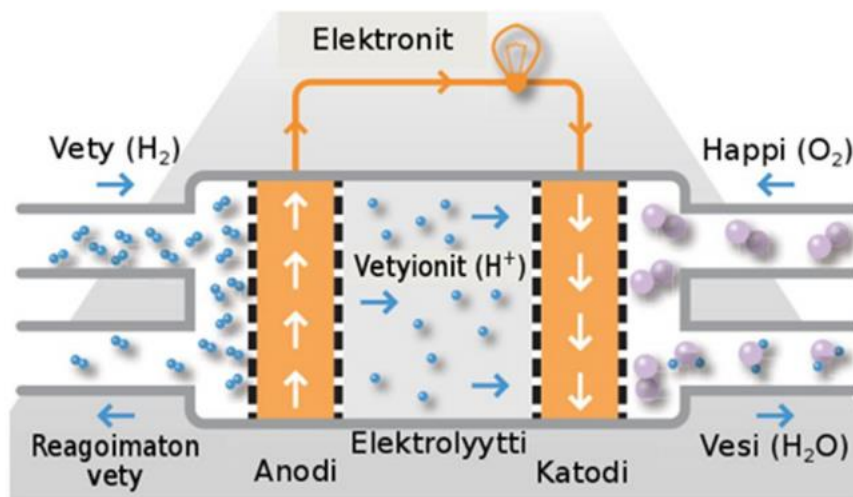
$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2)$$

jossa I on vauhtipyörän inertia momentti ja ω kulmanopeus.

2.6 Vetyvarasto

Vetyvarasto eli synteettisen polttoaineen varasto, jossa vedyn energiatiheys massaa kohti on korkea. Hajottamalla vettä sähkökemiallisesti vedyksi ja hapeksi saadaan varastointiin tarvittava vety. Normaaliooloissa kaasuna esiintyvä vety varastoidaan joko paineistettuna tai nesteytettynä ja tiivistäminen nesteolomuotoon vaatii paljon energiaa. Vedyn energiatiheys tilavuusyksikköä kohti kasvaa, sillä paineistus ja tiivistys kasvattavat sitä. Paineistettu vetykaasu säilötään metallisäiliöön maan päällä tai maan alla. (Alanen et al. 2003, 45–47.)

Polttokennon avulla tuotetaan sähköä, jolla vetyvarasto puretaan. Sähkökemiallisessa prosessissa anodin avulla vety hajoaa ja vapauttaa elektroneja. Katodin avulla vety, happi ja elektronit muodostavat yhtyessään vettä (Kuva 4). Prosessissa seurauksena vapautuu lämpöä. Elektrolyytinä polttokennossa voi toimia fosforihappo, keraaminen materiaali, polymeeri, sulakarbonaatti tai kaliumhydroksidi. (Alanen et al. 2003, 55–57.)



Kuva 4. Polttokennon periaatekuva (Fuel cell today, 2013)

2.7 Superkondensaattorit

Superkondensaattori muodostuu kahdesta elektrodista, joiden välissä on paperieriste ja elektrolyytinestettä. Elektrodien materiaalina alumiinikalvojen päällä käytetään huokoista aktiivihiiltä. Elektrolyytinesteen negatiiviset ionit siirtyvät positiiviselle elektrodille ja vastaavasti positiiviset ionit virtaavat negatiiviselle elektrodille latauksen aikana, jolloin kondensaattorin levyt varautuvat. Elektrodien suuri pinta-ala sekä varausten väliset lyhyet etäisyydet ovat syy, miksi superkondensaattoreilla on erittäin suuri kapasitanssi. (Hietalahti, 2011)

Superkondensaattorien edut akkupohjaisiin energiavarastoihin nähden ovat lyhyemmät lataus- ja purkuajat, suurempi tehoteho sekä runsaampi syväpurkaussykliden lukumäärä (> 500 000) eliniän aikana. Superkondensaattorin ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 2 perinteiseen lyijyakuun ja tavalliseen kondensaattoriin. Sisäisen resistanssin

kahdentuessa tai kun täyteen ladatun 11 kennon kapasitanssi laskee 20–30 %, superkondensaattorien elinikä katsotaan olevan lopussa. Superkondensaattorit sopivat erittäin hyvin suuritehoisten työkoneiden energiavarastoksi. Ne sopivat myös hyvin ajoneuvojen pienien energisten tehopiikkien tasaajiksi huomioiden niiden ominaisuudet. Viimeisen vuosikymmenen aikana, superkondensaattoreiden markkinat ja käyttösovellukset ovat kasvaneet nopeasti. Erityisesti sähköverkkoon liittyvät sovellukset ovat olleet osa tätä kasvua. (Hietalahti, 2011)

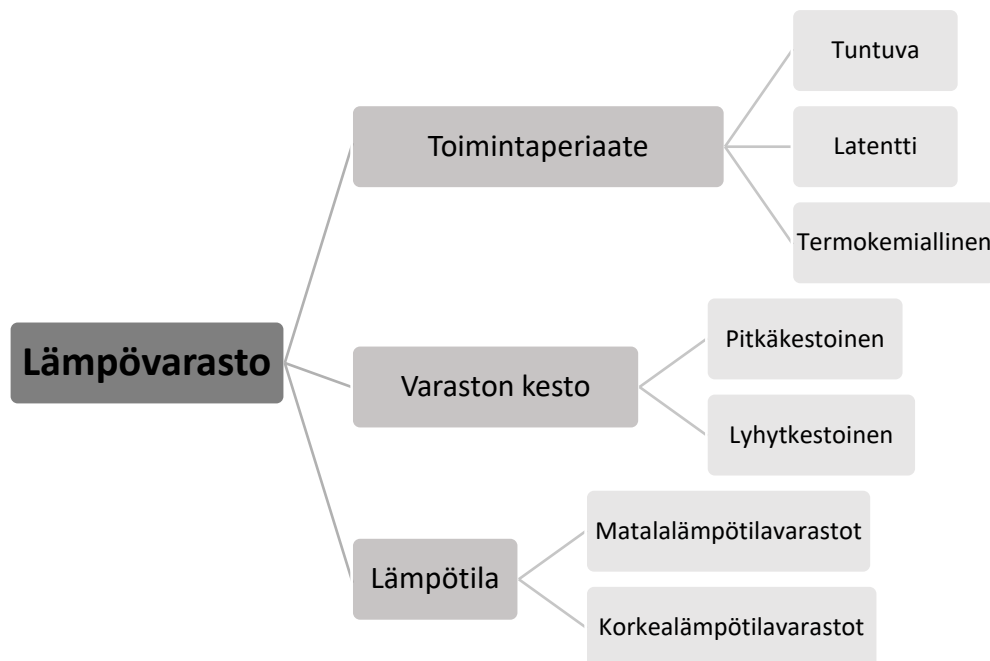
Taulukko 2. Superkondensaattorin ominaisuuksia verrattuna tavalliseen kondensaattoriin ja lyijyakkuun. (Hietalahti, 2011)

Parametrit	Kondensaattori (sähköstaattinen)	Superkondensaattori (sähkökemiallinen)	Lyijyakku
Purkausaika	$10^{-6} - 10^{-3}s$	1 – 30 s	0,3 – 3 tuntia
Latausaika	$10^{-6} - 10^{-3}s$	1 – 30 s	1 – 5 tuntia
Energiatiheys [Wh/kg]	< 0,1	1 - 11	20 - 100
Tehotiheys	> 10 000	1000 – 10 000	50 - 200
Lataus/purkaushyötysuhde	~ 1,0	0,90 – 0,95	0,7 - 0,85
Käyttölämpötila	- 40°C - +70°C	- 40°C - +70°C	- 20°C - +60°C
Toimintajaksojen lukumäärä	Rajaton	> 500 000	500 - 2000

3 LÄMPÖVARASTOT

Lämpöenergian varastoinnin tarkoituksena on lisätä energiajärjestelmien joustavuutta tasaamalla lämmöntuotannon ja -kulutuksen vaihteluita. Lämpövarastojen avulla lämpöä voidaan varastoida matalan kysynnän ja tuotantokustannusten aikaan, ja purkaa kun kysyntä ja tuotantokustannukset ovat korkeat. Varastot toimivat myös puskurina tuotanto ja jakeluhäiriöissä, jolloin häiriöiden korjaamiseen on enemmän aikaa, ennen kuin ne vaikuttavat kuluttajaan.

Lämpöenergian varastointi voi perustua tuntevan lämmön varastointiin, latenttilämmön varastointiin tai termokemialliseen varastointiin. Tuntevan lämmön varastointi on näistä mainituista yleisin. Arkisia esimerkkejä edellä mainitusta on muun muassa kuumavesivaraaja, lämmön varastoituminen takan rakenteisiin tai vaikkapa termospullo. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistetussa muodossa, miten lämpövarastot luokitellaan.



Kuva 5. Lämpöenergian varastoratkaisujen luokittelua (Dincer, I., Rosen, M. 2010)

Lämpövarastoja voidaan luokitella toimintaperiaatteiden lisäksi myös niiden sisältämän energian lämpötilan mukaan, niin kutsutuiksi matala- ja korkea lämpötilavarastoiksi. Lisäksi voidaan luokitella lämpövarastoja niiden syklien keston mukaan, eli lyhyt- ja pitkäkestoisiksi varastoiksi. Lyhyen aikavälin varastointi tarkoittaa käytännössä sitä, että lataus-purkausjakson keskipituus on muutamia vuorokausia, kun taas pitkän aikavälin

varastoinnissa se on viikoista kuukausiin. (Alanen et al. 2003, 14)

Yleisimmin lämpöä varastoidaan veteen, mutta lämpöä varastoidaan myös maanalaisissa varastoissa maaperään eli saveen, hiekkaan tai kallioon. Yleensä tuntuva lämpö varastoidaan kiinteään aineeseen, mutta osa siitä voi varastoitua myös pohjaveteen. Kuvaan 6 on esitetty eri lämpövarastoinnin päätyypin toimintaperiaatteen, millä aineen olomuodoilla toimintaperiaatetta toteutetaan ja lisäksi mitä aineita ja materiaaleja niissä käytetään.

Lämpövarasto	Toimintaperiaate	Olomuodot	Varastointimateriaaleja
Tuntuva	Lämpötilan muutos korkeimmalla mahdollisella lämpökapasiteetillä	Neste	Lämminvesi, orgaaniset nesteet, sulatetut suolat nestemäiset metallit
		Kiinteä	Metallit, mineraalit, savituotteet
Latentti	Olenaislämpö olomuodonmuutokselle	Neste – kiinteä	Nitridit, kloridit, hydroksidit, karbonaatit, fluoridit, eutektitumit
		Kiinteä – kiinteä	Hydroksidit
Termokemiallinen	Suuri määrä kemiallista energiaa absorboituu ja vapautuu tasapainotilaa muuttaessa paineen ja lämpötilan avulla	Kiinteä – kaasu	CaO/H ₂ O, MgO/H ₂ O, FeCl ₂ /NH ₃
		Kaasu – kaasu	CH ₄ /H ₂ O
		Neste - kaasu	LiBr/H ₂ O, NaOH/H ₂ O, H ₂ SO ₄ /H ₂ O

Kuva 6. Yleiskatsaus lämpöenergian varastointimenetelmistä (Dincer, I., Rosen, M. 2010)

Etenkin Suomessa on lämpövarastot rakennettu pääasiassa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten eli CHP-laitosten yhteyteen. Tällä tavalla voidaan maksimoida sähkön tuotantoa ja samalla vähentää ilmastoa kuormittavien kulutushuippukattiloiden käyttöä. Lämpövarastosta on hyötyä myös muun muassa vesireservinä putkivauriotapauksissa, tehoreservinä tuotantohäiriötapauksissa ja lämpövarasto toimii myös kaukolämpöverkon paineensietojärjestelmän osatekijänä ja paisuntasäiliönä. (Galkin-Aalto, M. 2018)

3.1 Tuntuva lämmön varastointi

Käytetyin lämmön varastointiratkaisu on tuntuva lämmön varastointi. Tässä varastointimenetelmässä lämpövarastomateriaaliin varastoidaan energiaa sen lämpötilaa muuttamalla. Varastomateriaalina voidaan käyttää vettä, öljyä, ilmaa, tiiltä, betonia, kallioperää ja ynnä muita materiaaleja. Jokaisella materiaalilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, mutta käytettävä materiaali yleensä valitaan sen lämpökapasiteetin sekä varastolle käytettävän tilavuuden mukaan. Tässä varastointiratkaisussa materiaaleille on myös ominaista niiden olomuodon pysyvyys varastoinnin aikana. Lämmön varastointi tapahtuu siis joko kiinteään aineeseen tai nesteeseen., mutta myös kaasuja pystytään käyttämään varastomateriaalina, nämä ratkaisut vievät kuitenkin paljon enemmän tilaa.

Sopivia varastomateriaaleja valittaessa tärkeitä ominaisuuksia vaatimuksia aineelle on korkea energiatiheys (korkea tiheys ja lämpökapasiteetti), hyvä lämmönjohtokyky (korkeampi kuin 0,3 W/mK), hyvä termien diffusiviteetti, helppo valmistettavuus/saatavuus ja alhainen hinta, vakaat kemialliset aineominaisuudet, alhainen korrosio ja pienet ympäristövaikutukset. (Li, 2016)

Tuntuvaa lämpöä varastoidaan kiinteään aineeseen kuten maanalaisissa varastoissa maaperään eli hiekkaan, saveen tai kallioon. Kiinteille aineille ominaista on korkea lämpötila-alue, mutta kohtalaisen matala ominaislämpökapasiteetti, kuten taulukosta 3 voidaan havaita. Veden korkean ominaislämpökapasiteetin ansiosta, vesi erottautuu nestemäisistä aineista ja vesi onkin yleisimmin käytettävä varastomateriaali tuntuvasa. (Alanen ym. 2003, 30–31.)

Tällaiseen varastoon sitoutunut lämpöenergia voidaan ilmaista yhtälöllä (3)

$$Q = cm\Delta T \quad (3)$$

missä

Q = lämpömäärä

m = varastomateriaalin massa

c_p = varastomateriaalin ominaislämpökapasiteetti

ΔT = lämpötilan muutos

Taulukko 3. Yleisimmin käytettyjen materiaalien ominaislämpökapasiteetteja (Piolichowska, K., Piolichowski, K. 2014.)

<i>Materiaali</i>	<i>Tiheys [kg/m³]</i>	<i>Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]</i>	<i>Lämpösisältö tilavuutta kohden [J/m³K]</i>
<i>Vesi</i>	988	4182	4.17
<i>Lasi</i>	2710	837	2.27
<i>Kallio</i>	2560	879	2.1
<i>Savi</i>	1458	897	1.28
<i>Tiili</i>	1800	837	1.51
<i>Hiekkakivi</i>	2200	712	1.57
<i>Puu</i>	700	2390	1.67
<i>Betoni</i>	2000	880	1.76
<i>Alumiini</i>	2710	896	2.43
<i>Teräs</i>	7840	465	3.68
<i>Sora</i>	2050	1840	3.77

3.2 Latentin lämpöenergian varastointi

Latentin lämmön varastot perustuvat aineen faasimuutoksiin. Koska faasimuutokset tapahtuvat vakio-*lämpötilassa*, latenteissa lämpövarastoissa voidaan pienellä lämpötilaerolla saada käyttöön suuria määriä lämpöä. Varaajat PCM (Phase Change Material) käyttävät hyväkseen tätä faasimuutosta. Faasinmuutos tapahtuu vakio-*lämpötilassa*, mutta lämpötila vaihtelee eri aineiden mukaan. Latentin lämpöenergian varastoinnissa hyödynnetään pääsääntöisesti vain kiinteä-*nestefaasimuutosta*. Faasinmuutoslämpöjä ovat sublimoitumislämpö, höyrystymislämpö ja sulamislämpö.

Tällaiseen varastoon sitoutunut lämpöenergia voidaan ilmaista yhtälöllä (4)

$$Q = m\Delta h \quad (4)$$

missä

Q = lämpömäärä [J]

m = varastomateriaalin massa [kg]

Δh = faasimuutoksen entalpia [J/kg]

Neste-kaasu- faasimuutos tarvitsee paljon energiaa ja kaasun vaatima tila ja sen paine on otettava huomioon kaasufaasin hallinnassa. PCM-materiaaleiksi kutsutaan latentin lämpöenergian varastointimateriaaleja ja ne jaetaan kolmeen alakategoriaan: eutektisiin, orgaanisiin ja epäorgaanisiin materiaaleihin. Pienellä lämpötilaerolla voidaan varastoida suuria lämpömääriä PCM varastoiden avulla, sillä niiden varastointitiheys on suuri. Koska latentin lämpöenergian varastoilla on 2-8 kertaa suurempi energiatiheys kuin tuntevan lämpöenergian varastoilla, voidaan niitä käyttää eri teknisissä ratkaisuissa. PCM varastoissa faasimuutos ei tapahdu kovin nopeasti ja juuri sen takia ne soveltuvat hyvin lämpötilavaihtelun ja lämpötilapiikkien tasaamiseen. Väliaineena käytetään yleensä PCM varastoissa jäätä, vettä, epäorgaanisten suolojen hydraatteja, suolaliuoksia ja rasvahappoja. (Alanen ym. 2003, 14)

Materiaalin kustannustehokkuus on yleensä tärkein kriteeri materiaalinvalinnassa tässä lämpövarastoratkaisussa, mutta muita huomioitavia tekijöitä ovat

- latentti sulamislämpö ja korkea tiheys
- kemiallisesti vakaa
- korkea lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti
- matala korroosioaste ja myrkyllisyys
- pitkä käyttöikä

(Reddy, Mudgal and Mallick, 2018)

Taulukossa 4 on esitetty joitakin potentiaalisia faasimuutosmateriaaleja ja niiden sulamislämpötiloja sekä faasimuutoksenlämpö-energian määriä. (Cabeza, L. ym. 2015)

Taulukko 4. Joitakin faasimuutosmateriaaleja ja niiden ominaisuuksia (Cabeza, L. ym. 2015)

<i>Yhdiste</i>	<i>Sulamislämpötila</i> [°C]	<i>Sulamislämpö</i> [J/g]
<i>K₂CO₃</i>	897	235
<i>NaCl</i>	800	492
<i>NaNO₃</i>	307	172
<i>LiNO₃</i>	250	370
<i>KClO₄</i>	527	1253
<i>MgCl₂</i>	714	452
<i>LiH</i>	699	2678
<i>MgF₂</i>	1271	936

3.3 Termokemiallinen lämmön varastointi

Termokemiallisen lämpöenergian varastointi tekniikassa käytetään palautuvia kemiallisia reaktioita, joissa molekyylisidoksiin sitoutuu lämpöä sidosten muodostuessa tai sidoksista vapautuu lämpöä sidosten katketessa.

Reaktio toteutuu seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



missä Y = työaine eli absorboituva tai adsorboituva neste tai kaasu (vesi, NH₃, ROH, SO₃, CO₂, H₂, O₂)

X = adsorbentti tai adsorbentti (silikageeli, zeoliitti, metallihydritit, karbonaatit, ammoniumyhdisteet, hydroksit).

Termokemiallisilla lämpövarastomateriaaleilla saavutetaan jopa 8-10 kertaa suurempi energiatiheys kuin tuntevan lämpöenergian varastointimateriaaleilla ja latentin lämpöenergian varastointimateriaaleihin verrattuna voidaan saavuttaa kaksinkertainen energiatiheys. Samankaltaiset vaatimukset varastointimateriaaleille pätevät termokemiallisille kuin tuntevan ja lämpöenergian varastointimateriaaleille, kuten alhaiset kustannukset ja korkea energiatiheys, mutta termokemiallisille pätee myös ainekohtaisesti sopiva reaktiolämpötila ja -aste sekä soveltuvuus todelliseen sovelluskäyttöön. Termokemiallinen varastoinnissa on ongelmana reaktioiden toistuvuus ja tämän takia tekniikka on vielä kehitysasteella. Tutkimukset ja kokeilut ovat pääasiassa painotettuna aurinkoenergian varastointiin. Termokemiallisilla materiaaleilla on paljon merkittäviä etuja verrattuna muihin lämmönvarastointi tekniikoihin, kuten kompakti kokoluokka, pitkäkestoinen varastointiaika ja vähäiset lämpöhäviöt ympäristöön, sillä materiaalit varastoidaan ympäristön lämpötilassa (Abedin ja Rosen, 2011). Taulukkoon 5 on koottu joitain mielenkiintoisimpia kemiallisia reaktioita, joita voidaan termokemiallisessa varastoinnissa käyttää. (Garg, H.P.; Mullick, S.C.; Bhargava, A.K. 2013)

Taulukko 5. Joitain kemiallisia reaktioita termokemiallisessa varastoinnissa. (Garg, H.P.; Mullick, S.C.; Bhargava, A.K. 2013)

Reaktio	Lämpötila [°C]	Lämpö [kJ/kg]
Metaani höyryn reformointi $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	480-1195	6053
Ammoniakin dissosiaatio $2\text{NH}_3 = \text{N}_2 + 3\text{H}_2$	400-500	3940
Metallihybridien terminen dehydraus $\text{MgH}_2 = \text{Mg} + \text{H}_2$	200-500	3079 lämpö, 9000 H ₂
Metallihydroksidien kuivattaminen $\text{CA}(\text{OH})_2 = \text{CAO} + \text{H}_2\text{O}$	402-572	1415
Katalyyttinen dissosiaatio $\text{SO}_3 = \text{SO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	520-960	1235

4 VARASTOINTIKUSTANNUKSET

Energian varastointijärjestelmien kokonaiskustannukset muodostuvat monista eri komponenteista kuten hankinta- ja asennuskustannuksista sekä muista ylläpitokustannuksista (Taulukko 6).

Taulukko 6. Energian varastointijärjestelmiin liittyvät kustannuskomponentit (Butler ym. 2005, 57)

Energiaa varastoiva laite	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sähkökemiallinen energiavasto 2. Sähkömekaaninen energiavarasto 3. Suoraan sähköä varastoiva järjestelmä
Liityntä AC-kuormaan ja syöttöön	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uudet siirtolinjat 2. Muuntajat verkon/akkujen AC-jännitteelle 3. Suojauslaitteet (esim. kytkimet, katkaisijat)
Tehoyksikkö	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kytkin (AC) 2. Tasasuuntaja/vaihtosuuntaja 3. DC-kytkin 4. Suojauslaitteet (esim. kytkimet, katkaisijat)
Apujärjestelmät	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sähköiset: liityntälaitteet, suojauslaitteet ja latauslaitteet 2. Mekaaniset: esim. telineet, vesi-, lämpö-, paineilma- ja pumppausjärjestelmät, turvajärjestelmät (ilmastointi, palontorjunta, hengityssuojaimet), jäähdytys- ja tyhjöjärjestelmät.
Valvonta- ja ohjausjärjestelmä	<ol style="list-style-type: none"> 1. Monitorointi- ja diagnostiikka: varastointilaitteet, tehon muunnos, apujärjestelmät (laakerit, jäähdytys- ja tyhjöjärjestelmät) 2. Ohjaus: varastointilaitteet, suojauslaitteet, tehoysikkö, apujärjestelmät.
Laitos, rakennus	<ol style="list-style-type: none"> 1. Perustus ja rakenteet 2. Materiaalit 3. Valaistus ja putkistot 4. Tiet ja maisemointi 5. Maadoitus ja kaapelointi 6. Lämmitys, ilmastointi ja jäähdytys
Työkustannukset	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rakentaminen 2. Asennus ja käyttöönotto 3. Käyttö

	4. Turvallisuuden ja terveyteen liittyvät raportoinnit
Pääomakustannukset	1. Alkupääoma 2. Korot
Kuljetuskustannukset	1. Kuljetuskustannukset 2. Luvat
Verot	
Palvelut	1. Projektin hallinta 2. Sähkön laatu ja stabilisuustarkastelut (esim. releet, harmonisten suodatus) 3. Luvat asennukseen ja toimintaan
Ohjaus/valvonta ja huolto	1. Huoltokustannukset 2. Koulutuskustannukset 3. Tiedonkeräily ja monitorointi

4.1 Sähkövarastojen investointikustannukset

Sähkövaraston on pystyttävä kilpailemaan kannattavuudessa perinteisten sähköntuotantomuotojen kanssa. Eri tekniikoiden kustannukset vaihtelevat paljon, mutta yleisesti sähkövarastojen investointikustannukset ovat suuria. Vaikka investointikustannukset ovatkin suuret, varastojen käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat sen sijaan pienet. Kustannusarviot vaihtelevat suuresti myös saman varastoteknologian sisällä. Kustannuksia voidaan tarkastella tehoyksikköä tai energiayksikköä kohden (€/USD /kWh tai €/USD /kW). (IEA, 2014)

Kaupalliseen käyttöön on rakennettu vähän varastoja, jolloin myös investointikustannusarviot vaihtelevat suuresti ja kirjallisuuslähteistä on vaikea löytää luotettavia arvoja. Vuonna 2014 IEA:n tutkimuksen mukaan sähkövarastojen investointikustannukset ovat 130 - 4600 Yhdysvaltain dollaria kilowattia kohti. Taulukossa 7 on taulukoitu eri varastoteknologioiden investointikustannukset dollareina kilowattia kohti.

Taulukko 7. Eri sähkövarastojen investointikustannukset kilowattia kohti. (IEA, 2014)

<i>Varastoteknologia</i>	<i>Investointikustannus [USD/kW]</i>	<i>Ensisijainen sovelluskohde</i>
<i>Akut</i>	300-3500	hajautettu tuotanto, lyhytaikainen varasto
<i>Vetyvarasto</i>	500-750	pitkäaikainen varasto
<i>Pumppuvoimalaitos</i>	500-4600	pitkäaikainen varasto
<i>CAES</i>	500-1500	pitkäaikainen varasto, arbitraasi
<i>SMES</i>	130-515	lyhytaikainen varasto
<i>Superkondensaattorit</i>	130-515	lyhytaikainen varasto
<i>Vauhtipyörä</i>	130-500	lyhytaikainen varasto

Kuten taulukosta nähdään paineilmaparaston (CAES) ja pumppuvoimalaitoksen, investointikustannukset ovat suurimmat. Tämä johtuu pitkälti pitkäaikaisvarastojen sijoituspaikasta ja sen pinnanmuodoista. Altaiden ja onkaloiden rakentaminen myös nostavat investointikustannuksia nopeasti, jos ne joudutaan rakentamaan tyhjästä. Lyhytaikaiseen energiavarastointiin käytettävät teknologiat kuten superkondensaattorit, vauhtipyörät ja SMES maksavat huomattavasti vähemmän. Vetyvarastojen investointikustannukset ovat hiukan suuremmat kuin edellä mainittujen. Akkujen investointikustannukset riippuvat käytetyistä materiaaleista sekä tekniikasta, joten niissä esiintyy paljon vaihtelevuutta.

Kustannusten korkea hinta hidastavat suuresti sähkövarastojen käyttöönottoa voimajärjestelmissä. Kustannustehokkuus on iso tekijä käyttöönotolle, joten yleensä otetaan käyttöön kustannustehokkaammat ratkaisut ennen energiavarastoja. IEA:n tutkimuksen mukaan sähkövarastojen kustannustehokkuus nousee kilpailukykyiseksi vasta silloin, kun muuttuvan uusiutuvan energian markkinaosuus nousee niinkin suureksi kuin lähemmäksi 50 prosenttia. (IEA, 2014)

Kehittämällä sähkövarastojen teknologioita voidaan laskea investointikustannuksia. IRENA (2017) arvion mukaan joidenkin sähkövarastojen investointikustannukset laskevat merkittävästi. Taulukosta 8 nähdään joidenkin sähkövarastojen parhaimmat ja huonoimmat investointikustannukset kilowattituntia kohden vuonna 2016 ja arvioidut vuodelle 2030.

Taulukko 8. Eri energiavarastojen investointikustannukset vuonna 2016 ja 2030. (IRENA, 2017)

Tekniikka	Vuosi	Energiavaraston investointikustannus [USD/kWh]		
		Huonoin	Oletus	Paras
Lyijyakku	2016	473	147	105
	2030	237	74	53
Sinkki-ilma-akku	2016	1050	347	315
	2030	360	119	108
Natrium-rikki-akku	2016	735	368	263
	2030	324	162	116
Vanadium-redox-akku	2016	1680	900	525
	2030	576	309	108
Litiumioniakku	2016	840	578	200
	2030	326	224	77
Paineilmavarasto	2016	84	53	2
	2030	71	44	2
Vauhtipyörä	2016	6000	3000	1500
	2030	3917	1959	979
Pumppuvoimalaitos	2016	100	21	5
	2030	100	21	5

4.2 Lämpövarastojen investointikustannukset

Lämmön varastointiin on useita erilaisia tekniikoita, jokaisella on oma erityinen suorituskykynsä, sovellus ja kustannukset.

Lämpövarasto järjestelmien tärkeät soveltamisalat ovat rakennusalalla (esim. lämmitys ja ilmastointi) ja teollisuudessa (esim. prosessilämmitys ja jäähdytys). Lämpövarasto järjestelmät voidaan asentaa joko keskitettyinä laitoksina tai hajautettuina laitteina. Keskitetyt laitokset ovat suunniteltu varastoimaan hukkalämpö suurista teollisista prosesseista, perinteisistä voimalaitoksista, yhdistettynä lämpö- ja voimalaitokset sekä uusiutuvat voimalaitokset. Niiden tehokapasiteettinsa vaihtelee tyypillisesti sadoista kW useisiin MW. Hajautetut laitteet ovat yleensä puskurisäilytys järjestelmät aurinkolämmön

keräämiseksi, joita käytetään talo- ja liikerakennuksissa (esim. kuumaa vettä, lämmitys ja kodinkoneet). Hajautetut järjestelmät ovat enimmäkseen välillä muutamasta kymmeneen kW.

Tuntuvan lämmön varastointiin perustuvat lämpövarastojärjestelmien varastointikapasiteetti on välillä 10-50 kWh / t ja varastointitehokkuus välillä 50-90%, riippuen varaston omasta ominaislämpökapasiteetista. PCM-materiaalit voivat tarjota suuremman varastointikapasiteetin ja varastoinnin hyötysuhteen kuten 75-90%. Varastointi perustuu useimmissa tapauksissa kiinteä - nesteen faasimuutokseen, jossa energiatiheydet ovat 100 kWh/m³ (esim. jää). Termokemialliset järjestelmät voivat saavuttaa varastointikapasiteetiksi jopa 250 kWh/t yli 300 °C:n käyttölämpötiloilla sekä hyötysuhteeksi 75%- lähes 100%. Täydellisen tuntuva lämmön järjestelmän kustannukset ovat välillä 0,1–10€/kWh, riippuen koosta, käyttösovelluksesta ja lämmöneristysteknologiasta. PCM- ja termokemiallisen-järjestelmien kustannukset ovat yleensä korkeammat. Näissä järjestelmissä täytyy asentaa lämmön (ja massan) siirtotekniikka, riittävän lataus- / purkaustehon saavuttamiseksi ja tämä tekniikka vaatii suuria kustannuksia. Latentti-järjestelmien kustannukset perustuvat PCM kustannuksiin, jotka ovat välillä 10–50 € / kWh, kun taas termokemiallisessa kustannusten arvioidaan olevan 8 ja 100 €/kWh välillä. Lämpövarastoinnin taloudellinen kannattavuus riippuu suuresti sovelluksesta ja toiminnan tarpeista, mukaan lukien varastointisykliä lukumäärästä ja tiheydestä. Lämpövarastointi järjestelmien arvioidut kustannukset sisältävät säilytysmateriaalit, lataamiseen tarvittavat tekniset laitteet ja purkamis- ja käyttökustannukset. (Dincer, I. 2011)

Godarzi, A (Godarzi, A. ym. 2013) suunnitteli PCM-varastointijärjestelmän, joka perustuu eksergo-taloudelliseen analyysiin ja geneettiseen algoritmi 45,4 kW LiBr / H₂O -järjestelmään. Heidän analyysinsä osoitti, että takaisinmaksuaika olisi 0,61 vuotta ilman PCM varastointia ja 1,13 vuotta PCM varastoinnin kanssa. Calise (Calise, F. 2011) tutki numeerisesti myös LiBr / H₂O-järjestelmää käyttämällä lämpöekonomista ja optimointi tekniikoita, ja 64% primäärienergiasta säästettiin 12 vuoden takaisinmaksuajalla.

Varastointivälineet tuntuva lämmön varastointi tekniikkaa varten ovat melko edullisia, koska ne koostuvat periaatteessa yksinkertaisesta säiliöstä ja lataus- / purkulaitteista. Varastointimateriaalit kuten vesi, maaperä, kivet, betoni tai sulat ovat yleensä suhteellisen

halpoja. Säilytysmateriaalin säiliö kuitenkin vaatii tehokkaan lämpöeristyksen, joka nostaa varastoinnin kustannuksia.

PCM varastointi ja termokemialliset-järjestelmät ovat huomattavasti monimutkaisempia ja kalliimpia kuin tuntuvaan lämmön järjestelmät. Useimmissa tapauksissa (esimerkiksi lämpökemialliset reaktorit) ne käyttävät tehostettua lämpöä ja massansiirtotekniikkaa vaaditun suorituskyvyn saavuttamiseksi varastointikapasiteetin ja tehon suhteen, ja laitteiden kustannukset ovat paljon korkeammat kuin varastointimateriaalien kustannukset. Järjestelmien kustannukset nousevat vielä korkeammiksi, jos käytetään kalliita mikrokapseloituja PCM-materiaaleja, jotta saadaan vältettyä lämmönvaihtopintojen käyttöä.

Latentin lämpöenergian varastointikustannuksia nostavat huomattavasti käyttötekniikan asennukset, jotka vaaditaan PCM- materiaalin käytössä. Esimerkiksi kalsiumkloridin varastointijärjestelmän kustannukset ovat melko halvat (0,3/kg), mutta säiliön, lämmönvaihtimen ja muiden komponenttien kustannukset ovat noin 65 / kWh (IRENA, 2013).

Termokemiallisen lämmön varastointi materiaalit ovat myös kalliita, koska ne on käsiteltävä (esim. pelletoitu tai kerrostettu). Kalliita ovat myös säiliöt ja termokemiallisen varastointiin tarvittavat apulaitteet lämmön ja massan siirtoon energian lataamisen ja purkamisen aikana. Termokemialliset järjestelmät voidaan käyttää joko avoimena järjestelmänä tai suljettuina järjestelminä. Avoin järjestelmä on usein halvin vaihtoehto, kun taas suljettu järjestelmä tarvitsevat hienostuneita lämmönvaihtimia. (Iten, M. 2016)

Lämpövarastojärjestelmän yleinen taloudellinen arviointi riippuu merkittävästi erityisestä sovelluksesta ja toiminnan tarpeista, mukaan lukien varastointisykliin lukumäärä ja taajuus. Taulukkoon 9 on koottu eri lämpövarastojen hyötysuhteen ja kustannusarviot.

Taulukko 9. Eri lämpövarastojen hyötysuhde ja kustannusarvio (IRENA, 2013)

Lämpövarasto	Hyötysuhde [%]	Kustannusarvio [€/kWh]
Tuntuva	50 - 90	0.1 - 10
Latentti	75 - 90	10 - 50
Termokemiallinen	75 - lähes 100	8 - 100

Lämpövarastotekniikoilla on tiettyjä esteitä markkinoille pääsulle, ja kustannukset ovat avaintekijä. Muut esteet liittyvät materiaalien ominaisuuksiin ja stabiilisuuteen, erityisesti termokemialliselle varastoinnille. Jokainen varastointisovellus tarvitsee erityistä suunnittelua sopimaan erityisiin rajaolosuhteisiin ja vaatimuksiin.

5 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Energiantuotanto on tärkeässä roolissa, kun ajatellaan energiavarastoinnin tulevaisuudennäkymiä. Energiantuotanto siirtyy koko ajan enemmän kohti uusiutuvia keinoja kuten esimerkiksi tuulivoima ja aurinkovoima. Näissä tuotantomenetelmissä ongelmana on vaihtelevat sää olosuhteet ja näin ollen kysynnän ja tuotannon suhde ja tämä on yksi selvimmistä syistä kehittää energiavarastoja.

Tähän mennessä käytetyin sähkövarastointi teknologia on pumppuvoimalaitokset. Niiden rakentamista rajoittaa tarvittava tietynlaisen ympäristön vaatimukset, mutta pumppuvoimalaitoksiin voidaan varastoida suurempia määriä energiaa. Eri sähkövarastoihin kuten paineilmaparastoihin ja akustoihin on tehtävä vielä kehitystä kapasiteetin ja hyötysuhteen osalta, jotta niihin on mahdollista varastoida yhtä suuria määriä energiaa. Paineilmaparaston varastointiprosessin kehityksellä pyritään tekemään tekniikasta adiabaattinen, sillä hukkaenergian talteenotolla on suuri merkitys paineilmaparaston hyötysuhteeseen. (A. Ter-Gazarian 2011)

Sähkövarastoinnin eri muodoista erityisesti akut ovat tulevaisuudessa isossa roolissa. Akkujen hinnat ovat laskeneet merkittävästi viime vuosina ja uusia akkutekniikoita kehitetään jatkuvasti. Sähköautojen akkujen hinnat ovat laskeneet vuodesta 2010 jo 40%. Tulevaisuudessa akut tulevat todennäköisesti yleistymään esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmien yhteydessä sekä tulevaisuudessa erilaiset Smart Grid eli älykäs sähköverkko yleistynevät. Näissä verkoissa on usein erilaisia (uusiutuvan) energian tuotantojärjestelmiä, kuten tuulivoimaloita ja aurinkopaneeleita. Nämä komponentit muodostavat sähköautojen kanssa älykkään sähköverkon, jossa energiaa voidaan varastoida muun muassa sähköautojen akkuihin. Näistä akuista voidaan tarvittaessa käyttää energiaa muualle verkkoon. Ja kun verkossa on ylituotantoa, voidaan energiaa varastoida akkuihin myöhempää käyttöä varten (Goel et al.2015, 1-9; Tuballa et al. 2016, 712-715.).

Sähköenergian varastointi kaasuun tai nesteeseen on myös yksi tulevaisuuden mahdollisista ratkaisuista. Suomessa on kehitteillä järjestelmä, jossa sähköenergia varastoidaan synteettiseen maakaasuun. Synteettinen maakaasu voidaan syöttää suoraan maakaasuverkkoon. Sähköenergia tuotettaisiin pääosin aurinko- ja tuulivoimalla, jolloin hiilidioksidipäästöt olisivat minimaaliset. (Pia Salokoski 2017, 16.)

Lämpöenergian varastointi menetelmistä tunnetun lämpöenergian varastointimenetelmä on kehittynein. Materiaalien ja sovelluksien osalta tätä on tutkittu ja kehitetty jo niin pitkälle, että tulevaisuuden kehittämiskohteet sijoittuvat pääsääntöisesti lämpövaraston käytön ympärille. Potentiaalinen tulevaisuuden kehityskohde tunnetun lämpöenergian varastoinnille on uusiutuvien energianlähteiden avulla saatavan lämpöenergian liittäminen suoraan kuluttajalle tai esimerkiksi kaukolämpöverkkoon (Geissbühler et al., 2016). Latentin lämpöenergian varastointiin tarvittavat faasimuutosmaterialit eli PCM-materiaalit omaavat paljon potentiaalisia ominaisuuksia tulevaisuutta varten niiden korkean energiatiheuden ansiosta. Niiden ominaisuuksissa ja sovelluskohtaisissa lämmönvaihtimissa on vielä paljon kehitettävää, jotta ne saataisiin yleistymään sovelluskäytössä (Cascone ja Perino, 2015) Latentin ja tunnetun energian yhteiskäyttö sisältää paljon hyötyjä ja yhteiskäyttö tarjoaa potentiaalisen kustannustehokkaan ratkaisun. (Geissbühler et al., 2016). Potentiaalisin lämpövarastointiteknologia on termokemiallinen lämmönvarastointi. Termokemiallisten materiaalit omaavat parhaat ominaisuudet lämpövarastoinnille kuten korkeimman energiatiheuden, mutta termokemiallisia materiaaleja on tutkittu vähän aikaa ja niissä riittää vielä kehitettävää, jotta ne saadaan yleistymään. Tässä varastoinnissa vaadittavat teknisesti vaikeat rakenteet sekä korkeat kustannukset aiheuttavat paljon haasteita (Abedin ja Rosen, 2011).

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, yleisimmät energiavarastointi tekniikat ja niiden toimintaperiaatteet. Työssä on esitelty käytetyimmät varastointitekniikat niin sähkö- kuin lämpövarastoinnissa. Tutkimus mahdollistaa paremman esittelyn energiavarastoista tutkimus- ja opetustarkoituksessa. Työn pohjalta voidaan hahmottaa sähkövarastointi ja lämpövarastointi sekä eri energiavarastotekniikoiden etuja, haittoja ja soveltuvuutta erilaisiin käytännön tilanteisiin. Työssä muodostettiin kattava kuva eri teknologioiden tarvittavista materiaaleista sekä ympäristöolosuhteista. Tutkimusten pohjalta nousi esiin mahdollinen jatkotutkimuksen tarve joidenkin tekniikoiden kehittämiseksi, jotka omaavat paljon potentiaalia tulevaisuutta varten.

Sähkövarasto on energiavarasto. Sähkövarastoa voidaan myös todeta resurssiksi, joka ottaa sähköenergiaa verkosta ja varastoi sen energian myöhempää käyttöä varten tai syöttää sähköenergian takaisin verkkoon. Sähkövarastojen avulla saataisiin parannettua kulutuksen ja tuotannon tasapainoa sekä se toisi joustavuutta sähköverkkoon, kun tuotettua sähköä ei olisi pakko välittömästi käyttää. Pumppuvoimaloihin on tähän mennessä suuret energiamäärät pääasiassa varastoitu, mutta ongelmana rakentamisessa on niiden vaatima tietynlainen ympäristö. Akkuihin ja paineilmaparastoihin tarvitaan vielä kehitystä hyötysuhteen ja kapasiteetin osalta, jotta niihin saataisiin varastoitua yhtä suuria määriä energiaa.

Lämpövarastot ovat myös energiavarastoja, mutta sähkönsijaan varastoidaan lämpöenergiaa. Lämpövarastot auttavat energian kysynnän ja tuotannon välisten vaihtelujen tasaamisessa, etenkin tulevaisuuden energiatuotannossa, jolloin uusiutuvat energianlähteet yleistyvät. Lämpövarastojen avulla voitaisiin tasata kysynnän ja tuotannon välisiä vaihteluja niin päivittäisten, viikoittaisten tai jopa kuukausien suhteen. Tuntuva lämpöenergian varastointi perustuu lämpötilaeroihin, latentin lämpöenergian varastointi taas perustuu varastoaineen faasimuutokseen, jossa sitoutuu tai vapautuu energiaa. Termokemiallisessa lämpövarastoinnissa sitoutuu tai vapautuu energiaa molekyyllisidosten muodostuessa tai katketessa. Huomattavasti suurempi energiatiheys on termokemiallisilla varastointimateriaaleilla kuin tuntuva- tai latentin varastointimateriaaleilla.

Energiavarastojen ongelmana on niiden kallis hinta. Sähkövarastoiden investointikustannukset ovat korkeat ja ongelmana on niiden heikko kannattavuus perinteisten sähköntuotantomuotojen kanssa. Vaikka käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovatkin pienet, sähkövarastojen käyttöönottoa hidastavat teknologioiden korkeat investointikustannukset. Pumppuvoimalaitokset ja vetyvarastot ovat pitkäaikaisvarastoja, joiden kustannukset ovat korkeat, mutta kannattavimmat tällä hetkellä suuren kokoluokan ansiosta. Lämpövarastojen investointikustannukset sen sijaan ovat alhaisemmat. Tämä on osin siitä, että lämpövarasto järjestelmät voidaan asentaa joko keskitettyinä laitoksina tai hajautettuina laitteina. Tuntuva lämmön varastointi kustannukset ovat melko edullisia niin varastointivälineiden kuin materiaaleiden osalta. Latentti ja termokemialliset järjestelmät ovat huomattavasti kalliimpia, sillä niiden vaatimat eri komponentit sekä apulaitteet nostavat huomattavasti kustannuksia. Myös niiden tarvitsemat varastointi materiaalit nostavat kustannuksia. Sekä sähkövarastojen että lämpövarastojen käyttöönotto paranisi lisäämällä tutkimusta ja kehitystä.

Energiavarastoja tarvitaan tulevaisuudessa, kun sähköä ja lämpöä tuotetaan yhä enemmän säästä riippuvien uusiutuvien energialähteiden avulla, kuten tuuli- ja aurinkovoimalla, jotka eivät kuitenkaan tuota tarvittavaa sähköä tai lämpöä vakaasti ja ennustettavasti. Energiavarastojen käyttöön liittyy haasteita kuten kustannukset sekä tarvittavan teknologian kehitys. Sähkövarastoinnissa eri varastointitekniikat vaativat vielä paljon kehitystä ja erityisesti akkujen kehitys on suuri kiinnostuksen kohde. Myös erilaiset Smart Grid- verkot yleistyvät. Lämpövarastointi tekniikoista tuntuva lämmön varastointi on pitkälti kehittynyt, mutta vaatii vielä tutkimista liitettävyyden osalta. Latentin ja termokemiallisen lämmönvarastointi on vielä alkumetreillä ja vaatii paljon tutkimusta ja kehitystä, mutta myös sisältää paljon potentiaalia tulevaisuuden kannalta. Energiavarastosovellukset ovat yleisesti vielä pilottiasteella etenkin lämpövarastosovellukset, mutta ovat myös kehittämisen osalta tulevaisuuden trendejä.

LÄHDELUETTELO

Alanen, Koljonen, Hukari & Saari. 2003 Energian varastoinnin nykytila. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.11.2019] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Barbour Edward. 2014. Polku: energystoragesense.com > energy storage technologies > SMES. [Verkkodokumentti] [Viitattu 20.11.2019] Saatavissa: <http://energystoragesense.com/superconducting-magnetic-energy-storage-smes/>

Energiateollisuus, Vesivoimalla eniten uusiutuvaa sähköntuotantoa, Polku: [Energia.fi](http://energia.fi) > Perustietoa energia-alasta > Energiantuotanto > Sähköntuotanto > Vesivoima, [Verkkodokumentti], [Viitattu 23.11.2019] Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima

Guerrero-Lemus, R. & Martínez-Duart, J.M. 2013. Electricity Storage. Teoksessa: Renewable Energies and CO2. Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological Trends- 2012 Edition. s. 307–333. London: Springer. Lecture Notes in Energy 3. ISBN 978-1-4471-4385-7 (eBook)

Geissbühler, L. et al.(2016) ‘Analysis of industrial-scale high-temperature combined sensible/latent thermal energy storage’, Applied Thermal Engineering, 101, pp. 657–668. [Viitattu 5.12.2019] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.031>

Hamilo Marko, 12.3.2014, 7 tapaa säilöä tuulta, julkaistu Tiede-lehdessä 12/13, [Verkkodokumentti], [Viitattu 29.11.2019] Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/7_tapaa_sailoa_tuulta

IEA 2014. Technology Roadmap: Energy Storage. [verkkójulkaisu] [viitattu 29.10.2019] Saatavissa: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>

Kara Mikko. 2004. Energia Suomessa. Painos 3. Edita Prima Oy. 396 sivua. ISBN 951-37-4256-3

Laatikainen Tuula, 28.10.2016, Pyhäsalmen 2019 lakkautettavalle kaivokselle halutaan uusi elämä 75 MWh:n sähkövarastona – etsii taas rahoittajia, Tekniikkatalous [Verkkodokumentti], [Viitattu 3.12.2019] Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/pyhasalmen-2019-lakkautettavalle-kaivokselle-halutaan-uusi-elama-75-mwh-n-sahkovarastona-etsii-taas-rahoittajia-6594754>

Motiva Oy. 2016. Vesivoimateknologia. Polku: Motiva.fi > Ratkaisut > Uusiutuva energia > Vesivoima > Vesivoimateknologia. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.12.2019] Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/vesivoima/vesivoimateknologia

IEA.Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids.2009. Verkkodokumentti. [Viitattu 13.11.2019] Saatavissa: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_storage.pdf. Luettu 10.3.2014.

Niskanen Eljas, 2014, YLE, [Uutinen] [Viitattu 25.11.2019] Kuva saatavissa: https://yle.fi/uutiset/osasto/sapmi/kasivarren_pumppuvoimala_rakennetaan_aikaisintaan_2017/7305302

Olabi A.G. 2017. Renewable energy and energy storage systems. Elsevier. Vol.136. [Viitattu 26.10.2018] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217312306?via%3Dihub>

Salokoski Pia. 2017. Tulevaisuuden energia 2030...2050 Taustaraportti. 1. Paino. Helsinki. ISBN 978-952-457-624-6

Tixador Pascal. 2008. Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective. IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, No. 3,

January 2008. [Viitattu 1.2.2019] Saatavissa:
http://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/CR5_Final3_012008.pdf

International Renewable Energy Agency (IRENA). The Energy Technology Systems Analysis Programmes (ETSAP): Technology Brief E17; International Energy Agency: Paris, France, 2013. Available online: <http://www.irena.org/Publications> (accessed on 8 July 2015).

Godarzi, A.; Jalilian, M.; Samimi, J.; Jokar, A.; Vesaghi, M.A. Design of a PCM storage system for a solar absorption chiller based on exergoeconomic analysis and genetic algorithm. *Int. J. Viittaus*. 2013, 36, 88–101.

Calise, F.; D'Accadia, M.D.; Vanoli, L. Thermoeconomic optimization of solar heating and cooling systems. *Energy Convers. Viittaus*. 2011, 52, 1562–1573.

Iten, M.; Liu, S.; Shukla, A. A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 2016, 61, 175–186.

Dincer, I.; Rosen, M.A. *Thermal Energy Storage: Systems and Application*; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2011.

The Industry Review 2012 [verkkodokumentti]. 2012. Fuel cell today. [Viitattu 4.12.2019]. Saatavissa: <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/industryreview/2012/the-industry-review-2012>.

Hietalahti, Lauri. *Sähkökäyttö ja hybriditeknikka, superkondensaattorit*, s.107- 109. Tampere, 2011.

A. Ter-Gazarian, *Energy storage for power systems* (2nd edition), 2011. Saatavissa: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpESPSE001/viewerType:toc//root_slug:energy-storage-for?kpromoter=marc

Cascone, Y. and Perino, M. (2015) 'Estimation of the thermal properties of PCMs through inverse modelling', in Energy Procedia, pp. 1714–1719. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021502007X>

Tuballa, Maria Lorena & Abundo, Michael Lochinvar, 2016. A review of the development of Smart Grid technologies, [verkkojulkaisu]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, 710-725. [viitattu 14.12.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.011>

Aneke, Mathew & Wang, Meihong, 2016. Energy storage technologies and real life applications –A state of the art review, [verkkojulkaisu]. Applied Energy, vol.179, 350-377. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>

Azzuni, Abdelrahman & Breyer, Christian, 2018. Energy security and energy storage technologies, [verkkojulkaisu]. Energy Procedia, vol. 155, 237-258. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.053>