

Kemian tekniikan kandidaattiohjelma

Kiinteiden energianvarastointijärjestelmien materiaalivaatimukset ja kierrätys

Miika Sorjonen

Kandidaatin tutkielma
2025

Copyright ©2025 Miika Sorjonen

Tekijä Miika Sorjonen

Työn nimi Kiinteiden energianvarastointijärjestelmien materiaalivaatimukset ja kierrätys

Koulutusohjelma Kemiantelekniiikan kandidaattiohjelma

Pääaine Kemian tekniikka ja prosessit

Vastuupettaja/valvoja TkT Jari Aromaa

Työn ohjaaja(t) DI Heikki Lappalainen

Päivämäärä 16.5.2025 **Sivumäärä** 30 **Kieli** suomi

Tiivistelmä

Kiinteät energianvarastointijärjestelmät tarjoavat ratkaisun uusiutuvan energian integrointiin osaksi sähköverkkoa ja mahdollistavat energian varastoinnin, kun tarjonta ylittää kysynnän. Energian varastointi on keskeisessä roolissa, kun halutaan varmistaa jatkuva sähkönsaanti, vähentäen sähkökatkojen riskiä sekä tasaten kuormituspiikkejä.

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus, jossa tarkasteltiin kiinteiden energianvarastointijärjestelmien suorituskykyä, materiaalivaatimuksia ja kierrätystä. Työssä keskityttiin erityisesti materiaalivaatimukseen akkujen osalta, mutta tutkittiin myös mekaanisten ja sähköisten varastointijärjestelmien materiaalivaatimuksia ja kierrätystä. Työssä esitetään yleisimmät energiavarastointimenetelmät pois-sulkien termiset energiavarastot sekä kemialliset energianvarastointimenetelmät. Yleisimpiin kiinteisiin energianvarastointijärjestelmiin kuuluu muun muassa pumppuvoimalaitokset, paineilmaenergiavarastot, vauhtipyörät sekä akut.

Tutkielmassa keskityttiin erityisesti materiaalivaatimukseen materiaalien saatavuuden kannalta sekä siihen, miten kierrätys vaikuttaa materiaalien saatavuuteen. Akuissa käytettävien kriittisten materiaalien, kuten litiumin, koboltin ja nikkelin saatavuudesta saattaa syntyä pulaa, jolloin nämä materiaalit tulee korvata ja niiden kierrätettävyyttä tulee parantaa.

Litium-rautafosfaattiakut sopivat energian varastointiin hyvän syklinkestävyyden ja kustannustehokkuutensa ansiosta. Litium-rautafosfaattiakut eivät ole yhtä riippuvaisia kriittisistä materiaaleista kuin muut kaupalliset akkuteknologiat, tehden niistä kestävämmän vaihtoehdon. Kiinteistä energianvarastointijärjestelmistä pumppuvoimalaitokset ovat kuitenkin suosituin teknologia vielä korkean hyötysuhteen, pitkän käyttöiän sekä teknologian kypsyyden takia.

Avainsanat Energiavarasto, akut, kriittiset raaka-aineet, kierrätys, materiaalien saatavuus

Author	Miika Sorjonen	
Title of thesis	Material requirements and recycling for stationary energy storage systems	
Programme	Chemical Engineering	
Major	Chemical Engineering and Processes	
Thesis supervisor	Dr Jari Aromaa	
Thesis advisor(s)	M.Sc. Heikki Lappalainen	
Date	Number of pages	Language
16.5.2025	30	Finnish

Abstract

Stationary energy storage provides a solution for integrating renewable energy into the grid and enables energy to be stored when supply exceeds demand. Energy storage plays a major role in ensuring a continuous power supply, reducing the risk of power outages, and balancing peak loads.

This bachelor's thesis is a literature review that examines the performance, material requirements and recycling of stationary energy storage systems. The primary focus is on battery technologies although the material demands, and recycling aspects of mechanical and electrical storage systems are also discussed. The thesis presents the most common energy storage methods, excluding thermal and chemical energy storage. The most common stationary energy systems include pumped hydro energy storage, compressed air energy storage, flywheels and batteries.

The thesis focuses particularly on material requirements in terms of material availability and how recycling affects material availability. The limited availability of critical materials used in batteries, such as lithium, cobalt, and nickel, may lead to supply shortages. To address this, these materials must be replaced, and their recyclability must be improved.

Lithium iron phosphate batteries are well suited for energy storage due to their good cycle life and cost-effectiveness. Furthermore, lithium iron phosphate batteries are less dependent on critical raw materials compared to other commercial batteries, making them a more sustainable alternative. Among stationary energy storage systems, pumped hydro energy storage remains the most widely adopted technology due to its high efficiency, long service life, and technological maturity.

Keywords Energy storage, batteries, critical raw materials, recycling, material availability

Sisällys

Esipuhe	6
Lyhenteet	7
1 Johdanto	8
2 Kiinteät energianvarastointijärjestelmät	9
2.1 Mekaaniset varastointijärjestelmät	9
2.1.1 Vauhtipyörät.....	9
2.1.2 Pumppuvoimalaitokset.....	10
2.1.3 CAES	11
2.2 Sähköiset varastointimenetelmät	12
2.2.1 Suprajohtava magneettinen varastointi (SMES)	12
2.3 Akkuteknologiat energian varastoinnissa	13
2.3.1 Lyijyakut	14
2.3.2 Litiumioniakut	15
2.3.3 Virtausakut	15
2.3.4 Muita akkuteknologioita	16
3 Materiaalivaatimukset.....	17
3.1 Mekaanisten järjestelmien materiaalivaatimukset	17
3.2 SMES materiaalivaatimukset	17
3.3 Akkujen materiaalivaatimukset.....	18
3.3.1 Lyijyakut	18
3.3.2 Litiumioniakut.....	19
3.3.3 Virtausakut	20
4 Kierrätys	21
4.1 Akkumateriaalien kierrätys	21
4.2 Sähköautojen akkujen uudelleenkäyttö	22
5 Tulevaisuuden kehityssuunnat	24
5.1 Natriumioniakut	24
5.2 Kiinteäelektrolyttiset akut.....	24
6 Johtopäätökset	26
Lähteet	28

Esipuhe

Haluan kiittää ohjaajaani DI Heikki Lappalaista neuvoista, ohjauksesta sekä mielenkiintoisesta aiheesta. Lisäksi haluan kiittää hyviä ystäviäni Eetua, Petrusta ja Joonatania. En olisi selvinnyt haasteistani ilman heidän tukeaan. Erityiskiitos kuuluu ystävälleni Karealialle, joka oli tukenani koko matkan ajan.

Lopuksi haluan kiittää vielä itseäni sinnikkydestäni.

Otaniemessä 16.5.2025

Miika Sorjonen

Lyhenteet

CAES	paineilmaenergiavarasto
SMES	suprajohtava magneettinen energiavarasto
LCO	litium-kobolttioksidi
NCA	litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi
NMC	litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi
LFP	litium-rautafosfaatti
LTO	litium-titaanioksidi

1 Johdanto

Siirtymässä kohti hiilineutraalia yhteiskuntaa tarvitaan ympäristöystävällisiä sekä taloudellisesti kannattavia vaihtoehtoja fossiilisille polttoaineille. Uusiutuvan energian, kuten aurinko- ja tuulivoiman osuus energiantuotannossa on kasvamassa globaalisti (IEA 2025). Aurinko- ja tuulivoimalla tuotettuun energiaan liittyy ongelma, sillä aurinko ei paista yöllä eikä aina tuule, jolloin energiaa ei voida tuottaa jatkuvasti. Uusiutuvan energian lisääntynyt tuotanto on luonut tarpeen kiinteille energianvarastointijärjestelmille, joihin voidaan varastoida energiaa myöhempää käyttöä varten (Kebede et al. 2020, 1).

Uusiutuvan energian varastointi mahdollistaa energian hyödyntämisen silloin, kun sitä tarvitaan, vähentäen fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tasottaen energian kysynnän huippuja. Kiinteät energianvarastointijärjestelmät ovat avainasemassa uusiutuvan energian integroinnissa sähköverkkoon sekä auttavat vihreässä siirtymässä (Kebede et al. 2020, 1). Pelkästään uusiutuvan energian varastointi näihin järjestelmiin ei muuta yhteiskuntaa hiilineutraaliksi vaan näiden järjestelmien elinkaari on myös suunniteltava ympäristöystävälliseksi.

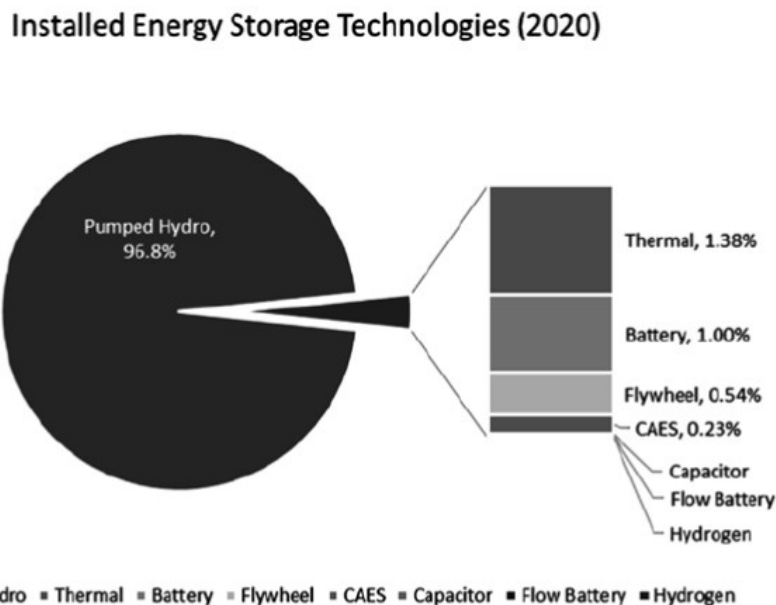
Energianvarastointijärjestelmien suunnittelussa on tärkeää huomioida näiden järjestelmien materiaalivaatimukset ja ympäristövaikutukset. Monissa akkuteknologiaan pohjautuvissa energianvarastointijärjestelmissä käytetään litiumioniakkuja. Näiden akkujen käyttö herättää kysymyksiä materiaalien riittävytydestä tulevaisuuden teknologioiden tarpeisiin (IEA 2023).

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia erilaisia kiinteitä energianvarastointijärjestelmiä sekä niiden materiaalivaatimuksia ja kierrätystä. Työssä syvennytään materiaalien vertailuun saatavuuden, kriittisyyden, käyttöiän, tehokkuuden sekä ympäristöystävällisyyden näkökulmista. Työssä tutkitaan, miten näitä järjestelmiä voidaan kierrättää sekä kierrätykseen liittyviä haasteita. Kirjallisuuskatsauksessa tutustutaan ensin kiinteisiin energianvarastointijärjestelmiin, josta edetään käsittelemään niiden materiaalivaatimuksia ja kierrätystä. Työssä tutkitaan myös tulevaisuuden näkymiä erityisesti akkuteknologian kehityksen osalta.

Tutkielma jakautuu seuraaviin lukuihin. Luvussa 2 käsitellään mekaanisia, sähköisiä ja akkupohjaisia energiavarastoja. Luvussa 3 käsitellään näiden energianvarastointijärjestelmien materiaalivaatimuksia. Luvussa 4 käsitellään järjestelmien kierrätystä ja lopuksi luvussa 5 tarkastellaan mahdollisia tulevaisuuden kehityssuuntia.

2 Kiinteät energianvarastointijärjestelmät

Kiinteät energianvarastointijärjestelmät perustuvat siihen, että sähkö muutetaan toiseksi energian muodoksi, jotta se voidaan varastoida. Tärkeitä parametrejä energianvarastointijärjestelmissä ovat teho- ja energiatiheys, kokonaishyötysuhde, itsepurkautumisnopeus, käyttöikä, materiaalien saataavuus, hinta, syklinkestävyys sekä kierrätyspotentiaali. (Hameer, & van Niekerk 2015). Tässä luvussa käsitellään mekaanisia, sähköisiä ja akkuihin perustuvia energian varastointimenetelmiä. Kuvassa 1. esitetään asennetut energianvarastointitekniologiat vuonna 2020. Kuvasta käy hyvin ilmi eri teknologioiden suosio.



Kuva 1. Kaavio vuonna 2020 asennetuista energianvarastointitekniologioista. (Hoff 2020)

2.1 Mekaaniset varastointijärjestelmät

Mekaanista energiaa esiintyy liike-energiana sekä potentiaalienergiana. Mekaanista energiaa voidaan varastoida muun muassa vauhtipyöriin ja pumpuvoimalaitoksiin (Hoff 2022, 74–75).

2.1.1 Vauhtipyörät

Vauhtipyörä on pyörivä kiekko tai sylinteri, joka on kiinnitetty sähkömoottoriin. Vauhtipyörä on mekaanisen energian varastointitapa, jossa sähköä varastoidaan liike-energiana pyörimisliikkeessä olevaan massaan (Hoff 2022, 56). Kun vauhtipyörään varastoidaan energiaa sen pyörimisnopeus kasvaa.

Vastaavasti sen pyörimisnopeus laskee, kun sen liike-energiaa muunnetaan sähköksi. Vauhtipyörien energiatiheys on 20–80 kWh/m³, tehotiheys on 800–2000 kW/ m³ ja vasteaika on jopa alle 10 ms (Kebede, et al. 2022, 9).

Vauhtipyörissä käytetään magneettisia laakereita vähentämään kitkaa. Vauhtipyörät suljetaan kammioon, jossa vakuumpumput laskevat kammion sisäistä painetta, jolloin vältytään ilman aiheuttamasta kitkasta, joka aiheuttaisi muuten suurta häviötä. Tästä johtuu niiden erittäin hyvä hyötysuhde 85–95 %. (Hoff 2022, 64.)

Vauhtipyörien energianvarastointikapasiteetti riippuu vauhtipyörän massasta ja geometriasta, joten niiden kapasiteetti ei käytännössä laske kuluminen myötä. Näin ollen vauhtipyörien merkittävä etu on niiden pitkä käyttöikä, yli 20 vuotta. (Amiryar & Pullen 2017, 11.) Vauhtipyörien toinen merkittävä etu on kyky säilyttää hyvä suorituskyky laajalla lämpötilavälillä (Hoff 2022, 64).

Vauhtipyörien heikkous on se, että ne menettävät varastoimaansa energiaa nopeasti verrattuna muihin energianvarastointiratkaisuihin. Vauhtipyörä menettää varastoimansa energian muutaman tunnin tai päivän kuluessa. Tyypillisesti 3–10 % varastoidusta energiasta menee vakuumpumpun, magneettisten laakereiden sekä moottorin energiatarpeisiin tuntitasolla. Käyttämällä suprajohtavia magneettisia laakereita saadaan niiden energiatarve alemmas, mutta silloin vauhtipyörät tulee sijoittaa kryogeenisiin olosuhteisiin. (Hoff 2022, 59.)

Vauhtipyörät sopivat käyttökohteisiin, jossa tarvitaan nopeasti energiaa johdun korkeasta tehotiheydestä ja lyhyestä vasteajasta, kuten sähköverkon taajuuden säätelyyn, jolloin säästytään sähköverkon katkoksilta. Vauhtipyörät eivät kuitenkaan sovi pitkäaikaiseen energianvarastointiin häviöiden takia. (Hoff 2020, 64–65.)

2.1.2 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoimalaitokset ovat maailman yleisin energianvarastointitekniologia. Ne perustuvat energian varastointiin potentiaalienergiana pumppaamalla vettä korkealla sijaitsevaan patoaltaaseen. Energiantarpeen kasvaessa patoon säilötty vesi vapautetaan alas. Vesi virtaa turbiinin läpi pyörittäen turbiinin roottoreita ja muuttaen veden liike-energian sähköksi. (Hoff 2022, 77.)

Pumppuvoimalaitosten sähköntuotantoon vaikuttaa kolme päätekijää, jotka ovat veden massa, pudotuskorkeus ja turbiinin hyötysuhde. Energiatiheys on

2,2 Wh/m³ per metri korkeudessa. Tyypillinen kokonaishyötysuhde on 70–80 %. (Hoff 2022, s. 78.)

Yksi merkittävä etu pumppuvoimalaitoksissa on niiden pitkä, jopa yli 50 vuoden käyttöikä sekä kyky varastoida energiaa pitkäksi aikaa ilman suuria häviöitä. Ainoat häviöt tulevat veden haihtumisesta, jolloin patoon pumpatun veden määrä ei vastaa padossa olevaa määrää (Hoff 2022, s. 78). Toinen merkittävä etu on se, että pumppuvoimalaitokset kestävät rajattoman määrän lataus- ja purkusyklejä (Hoff 2022, 99).

Pumppuvoimalaitoksilla on myös merkittäviä haittapuolia. Laitosten rakentaminen voi aiheuttaa haittaa paikalliselle ympäristölle, ja suurten laitosten rakentaminen voi kestää vuosikymmeniä. Jos vettä pumpataan luonnonlähteestä, se voi olla ekosysteemille ongelma. Lisäksi pumppuvoimalaitoksilla on maantieteellisiä rajoituksia, sillä patoaltaat tulee rakentaa korkealle. (Hoff 2022, s. 98.)

2.1.3 CAES

Compressed Air Energy Storage (CAES) on varastointitapa, jossa ilmaa puristetaan suljettuun tilaan, kuten luoliin tai paineastioihin. Ilmakompressori on laite, joka puristaa ilman molekyylit pienempään tilavuuteen nostaan puristetun ilman lämpötilaa ja painetta.

Kaupallisten paineilmaan perustuvien energiavarastointijärjestelmien tuotantokapasiteetti yhdellä yksiköllä on 100 MW. Kyseisten järjestelmien etuna ovat verrattain alhaiset pääomakustannukset ja vähäinen itsepurkautuminen, sillä puristettu ilma pysyy suljetussa tilassa ilman merkittäviä energiahäviöitä. Suurimpia haittapuolia ovat kuitenkin pitkä vasteaika, ja alhainen kokonaishyötysuhde. (Rabi, et al. 2023.)

Paineilmaenergiavarastojen alhainen hyötysuhde johtuu siitä, että kompressiossa ilman lämpötila voi nousta hallitsemattomasti, joten sitä täytyy viilentää ennen varastoimista. Vapautettaessa paineistettua ilmaa lämpötila laskee jyrkästi, jolloin ilman sisältämä energia pienenee. Täten sitä on lämmitettävä ennen käyttöä, mikä heikentää hyötysuhdetta sekä kasvattaa sen vasteaikaa. Verrattuna akkuihin, jotka ovat nopeita reagoimaan tarvittaviin energianmuutoksiin, CAES-järjestelmät ovat hitaita. (Hoff 2022, 106.)

CAES-teknologioiden hyötysuhde vaihtelee käytettävän teknologian mukaan. Perinteisten diabaattisten järjestelmien hyötysuhde on 40–60 %, kun taas adiaabaattiset paineilmaenergiavarastot voivat saavuttaa jopa 75 % hyötysuhteen. Isotermiset varastointitekniikat voivat sen sijaan saavuttaa jopa yli 90 % hyötysuhteen. (Rabi et al. 2023, 117.) Diabaattisissa CAES-

järjestelmissä puristuksen aikana syntyvää lämpöä ei hyödynnetä. Adiabaattisissa järjestelmissä lämpö varastoidaan energiavarastoon. Isotermisissä järjestelmissä ilma puristetaan ja varastoidaan isotermisesti eli ilman lämpötilan nousua, minkä ansiosta isotermisten CAES-järjestelmien hyötysuhde on parempi. Korkeampi hyötysuhde saavutetaan yleensä kalliimpien teknologioiden avulla ja prosessien optimoinnilla. (Rabi et al. 2023, 107.)

2.2 Sähköiset varastointimenetelmät

Sähköisiä varastointimenetelmiä ovat muun muassa kondensaattorit, superkondensaattorit sekä sähkön magneettinen varastointi suprajohtavaan keulaan. Kyseiset varastointimenetelmät - etenkin kondensaattorit – eivät tarjoa hyvää pitkäaikaista varastointia pienen kapasiteetin ja korkean itsepurkautumisnopeuden takia, jonka takia keskityn työssä magneettiseen varastointiin. (Kebede et al. 2022, 6.)

2.2.1 Suprajohtava magneettinen varastointi (SMES)

Suprajohtavassa magneettisessa energianvarastoinnissa sähköenergia varastoidaan suprajohtavan kelan luomaan magneettikenttään. Magneettikenttä syntyy, kun tasavirtaa syötetään suprajohtavan kelan läpi. Suprajohteissa ei ole resistanssia, joten häviöitä ei synny, mutta suprajohteet vaativat todella alhaiset lämpötilat. (Adetokun et al. 2022, 2.)

Suprajohteet eivät hajoa ajan saatossa, joten teknologian luotettavuus perustuu oheislaitteisiin, kuten tehonmuuntimiin, jossa häviöt ovat 2–3 % per suunta. SMES hyviä puolia ovat korkea hyötysuhde, joka on vähintään 95 %, vähäinen huoltotarve sekä erittäin korkea tehotiheys 500–5000 W/kg. Teknologian energiatiheys on kuitenkin vain 0,5–5 Wh/kg. (Hameer & van Niekerk 2015, 292.)

Suurin ongelma suprajohtavassa magneettisessa varastoinnissa on energian määrä, joka tarvitaan suprajohtavan kelan pitämiseen -296 °C (Adetokun et al. 2022, 4). Tämän teknologian käyttö tuottaisi ongelmia laajamittaisessa energianvarastoinnissa, sillä 1 GWh kapasiteetti edellyttäisi 160 kilometriä pitkän kelan, joka täytyisi myös pitää alhaisessa lämpötilassa. Lisäksi suprajohtavan kelan jäädyttämiseen huoneenlämmöstä -269 °C menee 4 kuukautta, joka on erittäin pitkä aika. Tästä voidaan päätellä, että aikaraja on ongelmallinen virhetilanteissa, joissa ongelman korjaaminen voi kestää kuukausia. (Adetokun et al. 2022, 8–9.)

SMES sopii nopeasti ja paljon energiaa vaativiin käyttökohteisiin, kuten tehopiikkien tasaamiseen, sen korkean tehotiheyden sekä matalan energiatiheyden takia (Kebede et al. 2022, 6). Suprajohtavan magneettisen

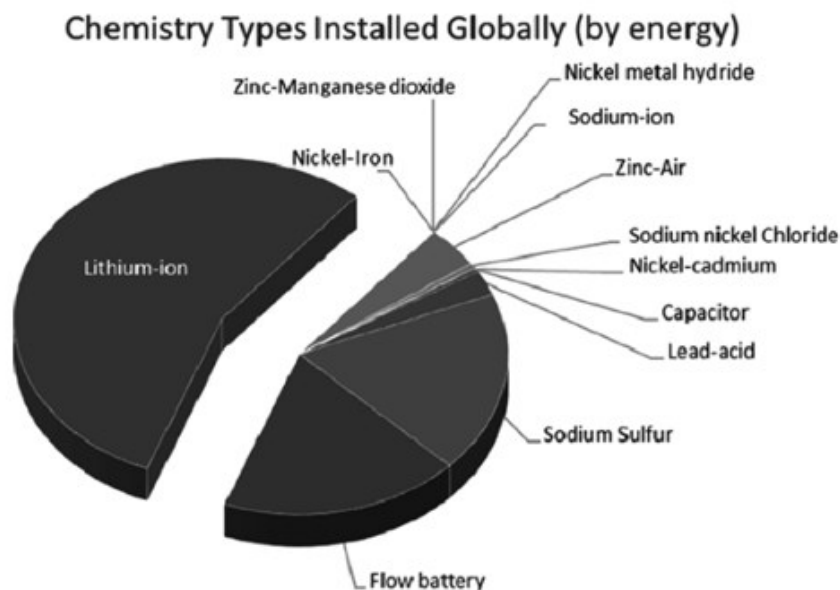
energiavarastoinnin huonoista puolista voidaan päätellä, että teknologia ei ole vielä kypsä pitkäaikaiseen energian varastointiin.

2.3 Akkuteknologiat energian varastoinnissa

Akut koostuvat useista akkukennoista, joista jokainen sisältää negatiivisen elektrodin (anodi), positiivisen elektrodin (katodi) sekä elektrolyytin. Elektrolyytti mahdollistaa ionien liikkumisen elektrodien välillä. Lisäksi elektrodien välissä on puoliläpäisevä kalvo, joka pakottaa elektronit kulkemaan ulkoista piiriä pitkin. (Hoff 2022, 145).

Akut varastoivat ja vapauttavat energiaa sähkökemiallisten reaktioiden avulla. Akun purkautuessa anodilla tapahtuu hapettumisreaktio, jossa anodi luovuttaa elektroneja. Ne kulkevat ulkoisen virtapiirin kautta katodille tuottaen sähkövirtaa käytettävälle kohteelle. Samalla elektrolyytissä olevat ionit liikkuvat katodille, jossa tapahtuu pelkistymisreaktio. Ulkoinen energialähde pakottaa reaktiot kulkemaan vastakkaiseen suuntaan. Akkujen suorituskyky perustuu käytettäviin materiaaleihin. (Hoff 2022, 145.)

Akut ovat keskeisessä roolissa energiajärjestelmissä, sillä ne mahdollistavat pitkäaikaisen uusiutuvan energian varastoinnin (Moseley & Garche 2014, 5). Akkuja käytetään sekä kiinteissä että liikkuvissa käyttökohteissa, kuten autoissa ja kannettavissa laitteissa. Kuvassa 2. on esitetty asennetut akkuteknologiat energiamäärän perusteella.



Kuva 2. Asennetut akkuteknologiat energian perusteella vuonna 2020 (Hoff, 2020)

Eri akkuteknologioiden ominaisuudet eroavat energian varastointikapasiteetin, käyttöiän, tehokkuuden, kierrätettävyyden ja kustannusten suhteen. Kiinteissä akkusovelluksissa tärkeää on suuri energiakapasiteetti, pitkä käyttöikä, korkea hyötysuhde, kustannustehokkuus ja hyvä syklikestävyys (Moseley & Garche 2014, 7). Seuraavaksi tarkastellaan yleisimpiä akkuteknologioita sekä esitellään joitakin vähemmän käytettyjä teknologioita.

2.3.1 Lyijyakut

Lyijyakut ovat olleet käytössä jo 1800-luvulta saakka. Tästä syystä niiden teknologia on hyvin vakiintunutta, mikä helpottaa sen käyttöönottoa ja käyttöä. Lyijyakut ovat myös kustannustehokkaita verrattaessa muihin akkuteknologioihin. Lyijyakut voidaan jakaa lyijyhappo- ja lyijyhiiliakkuihin, joista lyijyhappoakut ovat vanhempi ja suositumpi teknologia. (Hoff 2022, 152.)

Lyijyhappoakkujen energiatiheys on 30–50 Wh/kg, tehotiheys on 75–300 W/kg, hyötysuhde 70–80 % ja käyttöikä on 5–15 vuoteen (Kebedin et al. 2022, 4).

Matala energiatiheys johtuu siitä, että lyijy on tiheydeltään painava metalli, mutta samalla yksi harvoista sähköjohtavista materiaaleista, joka kestää rikkihappoa. Jos kennossa käytetään muita metalleja, tulee ne päällystää lyijyllä. Lyijyakkuihin myös lisätään ylimääräistä lyijyä, käyttöiän pidentämiseksi. Jos akun kennoissa käytetään muita materiaaleja, ne pitää suojata lyijyllä, koska lyijy kestää rikkihappoa. Tämän takia akkuun varastoitava energia suhteessa painoon laskee, koska lyijy on tiheydeltään raskas materiaali. Lyijyhiiliakut ovat hieman kevyempiä, koska osa anodista korvataan hiilellä, joka on kevyempää kuin lyijy. (Hoff 2022, 157.)

Lyijyakkujen käyttöikä lyhenee merkittävästi, kun lyijysulfaatti kristallisoituu elektrodien pinnalle vähentäen akun kapasiteettia. Tämän välttämiseksi tulee akku ladata täysin täyteen, jotta elektrodi puhdistuu kokonaan. Akun liiallinen purkautuminen lyhentää sen käyttöikää merkittävästi. Myös lämpötilan nousu lyhentää käyttöikää. Sen takia lyijyakkuja tulisikin käyttää 20–25 asteen lämpötilassa. (Hoff 2022, 161–163.)

Lyijyakut eivät nykyään ole niin suosittuja energianvarastoinnissa, koska kehittyneemmät akkuteknologiat tarjoavat parempia ratkaisuja energian varastointiin. Lisäksi lyijyakut ovat ympäristölle haitallisia. Vaikka lyijy voidaan kierrättää, kierrätys on tehtävä huolellisesti, sillä lyijy on myrkyllistä. Lyijyakut ovat alttiita lämpötilavaihteluille, mikä on merkittävä haittatekijä. Kiinteissä energian varastointijärjestelmissä voisi olettaa, että

energiatiheydellä ei ole väliä. Tämä ei kuitenkaan ole aivan totta, sillä mitä suurempi energiantiheys, sitä vähemmän tilaa tarvitaan. Puhuttaessa suuren mittakaavan energiavarastoista tarvitaan hyvin monta akkua, jolloin pieni energiantiheys on todellakin huomattavissa tilankäytössä. Kaliforniassa oli aiemmin energiavarasto, jonka kapasiteetti oli 40 MWh, ja sen akut veivät tilaa noin 4500 m² edestä. (Hoff 2022, 164)

2.3.2 Litiumioniakut

Litiumioniakut ovat yleisin akkuteknologia nykypäivänä (kuva 2). Litiumioniakkujen hyviä puolia ovat korkea energiantiheys, parempi lämpötilanvaihtelujen sietokyky, pienempi itsepurkautuminen ja ne kestävät useamman lataus- ja purkusyklin (Hoff 2022, 175).

Litiumioniakun ominaisuuksiin vaikuttaa siinä käytetyt materiaalit. Yleisin anodimateriaali on grafiitti. Muitakin materiaaleja toki käytetään, kuten sili-konia. Litiumioniakut tarjoavat hyvän energiantiheyden, niiden operointi on helppoa ja ne ovat edullisia suhteessa muihin vaihtoehtoihin (Kebede et al. 2022, 4). Peruseriaate on, että anodina on grafiittia, joka ottaa litiumia vastaan. Katodi on jokin metalliyhdiste, joka sisältää litiumia, kuten litium-kobolttioksidi (LCO), litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA), litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC) ja litium-rautafosfaatti (LFP). Akun ominaisuuksiin vaikuttaa käytettävät materiaalit sekä näiden materiaalien suhde toisiinsa. Akun materiaalivaatimuksiin palataan seuraavassa luvussa.

Litiumille ominainen energiantiheys on 75–250 Wh/kg, hyötysuhde 85–95 % ja itsepurkautuminen 0,1–0,3 % päivässä. Litiumin ominaisuuksiin vaikuttavat käytettävät materiaalit. Litiumin käyttöikä vaihtelee 5–15 vuoden välillä. (Kebede 2020, 4.)

2.3.3 Virtausakut

Virtausakut eroavat perinteisistä akuista siinä, että energiaa ei varastoida elektrodeille vaan se varastoidaan nestemäiseen elektrolyyttiin. Virtausakuissa elektrolyytit kiertävät säiliön ja akunkennon välillä. Nesteet eivät pääse suoraan kosketuksiin toistensa kanssa, vaan ionit kulkevat ioninvaihtokalvon kautta. Ionivirta aiheuttaa sähkökemiallisen reaktion. Hyvän tästä teknologiasta tekee sen, että kapasiteetin kasvattaminen on yksinkertaista. Riittää, että elektrolyyttisäiliön kokoa kasvatetaan.

Kiinteissä energianvarastointijärjestelmissä käytetään yleisimmin sinkki- ja vanadiinivirtausakkuja. Virtausakkujen etuja ovat 15 vuoden käyttöikä, lähes olematon itsepurkautuminen. Virtausakkujen energiantiheys on 10–35 Wh/kg, kokonaisyötysuhde 65–85 %. Pitkä käyttöikä johtuu siitä, että

virtausakuissa ei ole elektrodeja, jotka rappeutuisivat ajan saatossa. Virtausakuilla on alhainen energiatiheys, ja akkujen rakenne on monimutkaisempi pumppujen, putkien ja säiliöiden takia. (Kebede et al. 2022, 5.)

2.3.4 Muita akkuteknologioita

Muita tyypillisiä akkuja ovat nikkeli- ja natriumakut. Nikkeliakuista erityisesti nikkelikadmium akut ovat tyypillisiä, mutta kadmiumin on erittäin haitallista ympäristölle ja tästä syystä sen käyttö on kielletty kuluttajatuotteissa EU:n akkudirektiivin mukaisesti.

Nikkelikadmium akkujen energiatiheys 50–75 Wh/kg ja niillä on laaja lämpötilavaihteluväli. Nikkelikadmium akkujen valmistus on kallista (~\$1000/kWh). Osa nikkeliakuista kärsii niin sanotusta muistiefektistä, jolloin akun kapasiteetti pienenee, jos akkua ei ladata aivan täyteen tai pureta tyhjäksi. Nämä ominaisuudet tekevät nikkelikadmium akuista epäideaalisen energian varastointiin. (Fan 2020, 97.)

Kuvan 2. mukaan natriumrikkiakut (NaS) ovat suhteellisen suosittu akkuteknologia kiinteissä energian varastoinnissa. Natriumrikkiakuissa anodimateriaalina toimii nestemäinen natrium ja katodimateriaalina nestemäinen rikki. Elektrodit ovat erotettu natriumbeeta-alumiinioksidilla, joka toimii myös elektrolyytinä. Akun tehokas toimiminen vaatii korkean lämpötilan 300 °C – 360 °C pitääkseen elektrodimateriaalit nestemäisenä. Raportin mukaan natriumrikkiakuille tyypillinen energiatiheys on 200 Wh/kg. Energiatiheys vaihtelee niitä valmistavan yrityksen mukaan. Natriumrikkiakut omaavat pitkän käyttöiän 15–20 vuotta. (EASE 2018.)

3 Materiaalivaatimukset

Luvussa keskitytään erityisesti materiaalivaatimuksiin materiaalien saatavuuden ja kriittisyyden kannalta. Materiaalien saatavuus on tärkeä parametri erityisesti akkujen suhteen, sillä akuissa käytetään monia kriittisiä materiaaleja.

3.1 Mekaanisten järjestelmien materiaalivaatimukset

Vauhtipyörä tehdään lähinnä teräksestä, hiilikuidusta, kuparista. Osa vauhtipyöristä sisältää neodyymiä, jota käytetään magneettisissa laakereissa. Neodyymi on harvinainen maametalli, mutta sen käyttömäärät ovat pieniä verrattuna akuissa käytettävien kriittisten materiaalien määriin. Näin ollen vauhtipyörä on edelleen hyvä lyhyen ajan varastointiteknologia esimerkiksi sähköverkon jännitteen ylläpitämiseen. (Hoff 2022, 64.)

Vauhtipyörien roottoreissa käytetään yleensä terästä, jos ne pyörivät alle 10 000 kierrosta minuutissa. Jos vauhtipyörät pyörivät yli 10 000 kierrosta minuutissa, niissä käytetään vahvoja ja kevyitä materiaaleja, kuten hiilikuitua. Näiden materiaalien saatavuudesta ei ole mitään pulaa, joten teknologia on materiaalien saatavuuden kannalta erinomainen. (Hoff 2022, 59.)

Pumppuvoimalaitosten ja CAES:n rakentamiseen käytetään betonia ja terästä, joten niiden materiaalivaatimukset ovat eriluontoisia verrattaessa akkuihin. Näitä teknologioita tarkastellessa on tärkeää huomioida pitkä käyttöikä ja hyötysuhde, kun suunnitellaan kyseisiä energiavarastointijärjestelmiä.

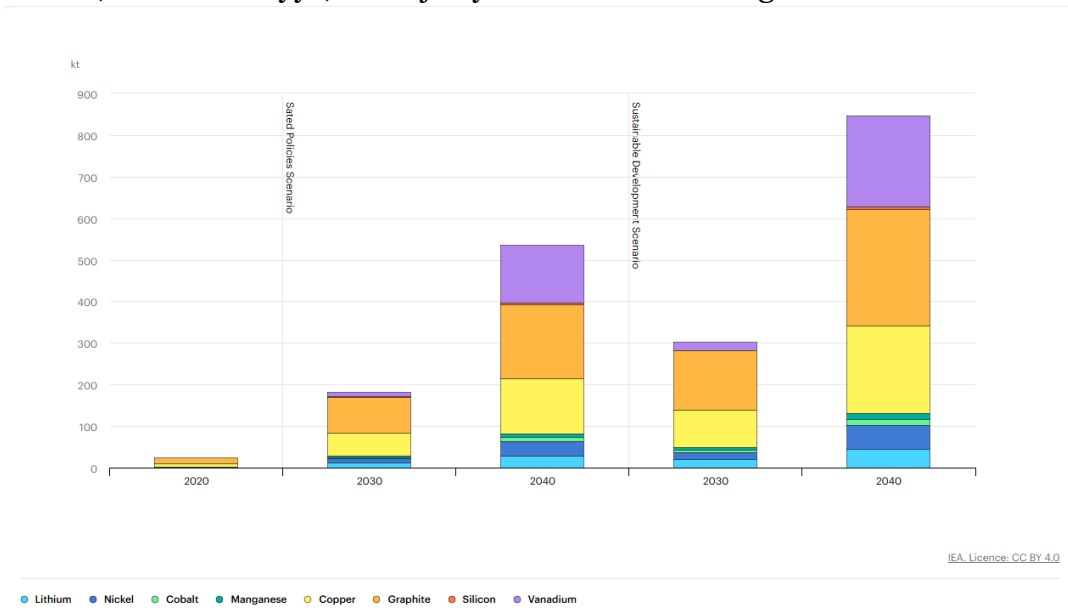
3.2 SMES materiaalivaatimukset

Suprajohtavissa magneettisissa varastointiratkaisuissa käytetään suprajohteita, jotka tarvitsevat todella alhaisen lämpötilan toimiakseen. Suurin osa suprajohtavista keloista tehdään johteista, jotka sisältävät niobium-titaani-seosta (Adetokum et al. 2022).

Niobium ja titaani ovat molemmat EU:n kriittisten materiaalien listalla, joten kyseisten mineraalien saatavuuteen saattaa liittyä riskejä. Kyseisten mineraalien saatavuus on etenkin geopoliittisesti uhattuna, mikä voi tehdä suprajohtavista magneettikeloista vähemmän houkuttelevan vaihtoehdon. (IEA 2020.)

3.3 Akkujen materiaalivaatimukset

Kiinteissä energianvarastointijärjestelmissä käytettävien akkujen materiaalivaatimukseen vaikuttavat suorituskyky, turvallisuus, kestävyys, hinta ja materiaalin saatavuus. Etenkin tulevaisuudessa akkumateriaalien kasvava tarve voi aiheuttaa ongelman materiaalien saatavuudessa. Kuvassa 3. esitetään akkuvarastojen ennustettu materiaalitarve. Kiinteitä energianvarastointijärjestelmiä voidaan käyttää myös huippukuorman tasaukseen tai verkon tasapainottamiseen, johon tarvitaan nopeaa vasteaikaa, jonka akut tarjoavat. Tärkeimpiä parametrejä valitessa materiaaleja akkuja varten ovat pitkä käyttöikä, alhainen itsepurkautuminen, hyvä energiatiheys, raaka-aineiden saatavuus, kierrätettävyys, hinta ja kyseisen akkuteknologian tunteminen.



Kuva 3. Mineraalikysyntä akkuvarastoinnille vuosina 2020–2040.(IEA, 2023)

3.3.1 Lyijyakut

Lyijyakuissa käytetään katodimateriaalina lyijyoksidia (PbO_2), anodimateriaalina lyijyä (Pb) ja elektrolyyttinä käytetään rikkihappoa (H_2SO_4). Akun koteloiden tulee olla valmistettu materiaalista, joka kestää rikkihappoa, kuten polypropeenaa. Akun materiaalivaatimukset eivät sisällä mitään kriittisiä materiaaleja, joten saatavuuden kannalta ei ole ongelmaa. Kuitenkin lyijyakkujen tarjoama käyttöikä on lyhyt ja niiden energiatiheys on pieni, mikä vaatii, että suurien energiamäärien varastointiin tarvittaisiin todella suuri energiavarasto. Lyijyakkujen suorituskyky on hintaan nähden hyvin kustannustehokas, joka tekee siitä hyvän vaihtoehdon keskisuuriin ja suuriin energianvarastointijärjestelmiin. (Moseley, Garche 2014, 207.)

3.3.2 Litiumioniakut

Litiumioniakkujen elektrolyytit ovat joko nestemäisiä, puolikiinteitä tai kiinteitä. Nestemäiset elektrolyytit ovat litiumsuoloja, kuten LiPF_6 tai LiBF_4 . Puolikiinteät elektrolyytit ovat polymeerielektrolyyttejä, kuten polyeteenioksidia. Kiinteitä elektrolyyttejä ovat esimerkiksi litiumsuperionijohteet. (Fan et al. 2020, 98–99.)

Kiinteät elektrolyytit eivät ole yhtä alttiita syttymään kuin nestemäiset elektrolyytit, koska nestemäisissä elektrolyyteissä käytetään orgaanisia liuottimia, jotka ovat herkkiä syttymään. Kiinteitä elektrolyyttejä käyttämällä voidaan parantaa akkujen turvallisuutta sekä energiatiheyttä. (Kim et al. 2015, 300.)

Litiumioniakuissa käytettävät anodimateriaalit ovat yleensä grafiittia. Grafiitin allotrooppisen rakenteen ansiosta, sen sähkökemialliset ominaisuudet ovat hyvät. Sen huono puoli on kuitenkin siinä, että anodissa on yksi litiumioni 6 hiiliatomia kohden, jolloin sen energianvarastointikapasiteetti ei ole niin suuri kuin esimerkiksi anodimateriaaleilla, joissa on käytetty metallioksideja, kuten litiumtitaanioksidia.

Kuten kappaleessa kaksi käsiteltiin, litiumin katodimateriaalina voidaan käyttää metallioksideja, kuten litium-kobolttioksidia. Muita käytettäviä materiaaleja ovat litiumrautafosfaatti ja nikkelpohjaiset materiaalit, kuten NMC ja NCA.

Valitessa parasta vaihtoehtoa tulee ottaa huomioon litiumin, koboltin, mangaanin, nikkelin ja grafiitin saatavuus. Energiavarastoissa käytettävillä akuilla ei ole ehdotonta olla korkea energiatiheys, kuten esimerkiksi sähköautoissa, koska niissä akun paino ja tilavuus vaikuttavat suoraan auton kantamaan.

LCO tarjoaa alhaisen itsepurkautumisen ja se kestää monta lataus-purkausykliä. LCO:lla on kuitenkin huono lämmönkestävyys, sen kapasiteetti heikenee suurilla virrankulutuksilla. Lisäksi koboltti on kallista. Tämä tekee LCO:n käytöstä kiinteissä energiavarastointijärjestelmissä huonon vaihtoehdon, sillä riippuen energiantarpeesta, virrankulutus voi olla todella suurta. Lisäksi suurissa energiavarastoissa tarvitaan monta akkua, jolloin ei ole ideaalia, että akun raaka-aineet ovat kalliita (Nitta 2015, 255.)

LFP-akuissa on alhaisempi energiatiheys verrattuna muihin litiumioniakkuihin. LFP-akut kestävät yli 3000 lataus- ja purkusykliä ja yli 5000, jos anodimateriaalina käytetään LTO:ta. Grafiitin käyttäminen anodimateriaalina

on kuitenkin kustannustehokkaampi ratkaisu, joten se sopii paremmin energiavarastoihin. LFP-akut, joissa käytetään grafiittia anodina ovatkin suosittu vaihtoehto energiavarastoissa. Siihen vaikuttavia syitä ovat pitkä käyttöikä, kustannustehokkuus sekä monen lataus- ja purkusyklin kestäminen. (Porzio, Scown 2021, 2.)

Akuissa, joissa on nikkeliä, on korkeampi energitiheys, kun taas koboltti nostaa tehoa ja mangaani vähentää lämpökarkaamisriskiä. Näin ollen NMC-akut, jotka sisältävät näitä kaikkia ovat tällä hetkellä liian kallis teknologia suuria energiavarastoja varten. Myös NCA-akut ovat suhteellisen kalliita, eivätkä ne kestä yhtä monta lataus- ja purkusykliä kuin LFP-akut. (Porzio, Scown 2021, 2.)

Litiumioniakuissa käytetyistä materiaaleista litium, koboltti, luonnollinen grafiitti ja titaani ovat EU:n mukaan luokiteltu kriittisiksi raaka-aineiksi. Näiden materiaalien käyttäminen on siis kalliimpaa. Suunniteltaessa isoja energiavarastoja tulee huomioida materiaalien saatavuuden vaikutus materiaalikustannuksiin. Tästä voidaan päätellä, että ei ole taloudellisesti järkevää rakentaa LTO-akkuja, kun LFP-akut toimivat paremmin samaan käyttötarkoitukseen. Lisäksi litiumin saatavuus voi tulevaisuudessa heikentyä, mikä voi johtaa hinnannousuun (IEA 2020). Tämän takia on löydettävä vaihtoehtoisia materiaaleja litiumille.

3.3.3 Virtausakut

Kappaleessa 2.3.3 käsiteltiin virtausakkujen ominaisuuksia, sekä kerrottiin yleisimmin kiinteissä energianvarastointijärjestelmissä käytettävät virtausakkutyypit. Virtausakut voidaan jakaa kahteen käytetyimpään kategoriiaan; vanadiini- ja sinkkivirtausakkuihin, joista jälkimmäinen voidaan jakaa vielä sinkkibromidi-, sinkkinikkeli-, sinkkirauta- ja sinkki-jodivirtausakkuihin. Sinkkivirtausakuista suosituin ja käytössä oleva on sinkkibromidiakku. Sinkkiä on runsaasti maaperässä ja sinkki on edullinen verrattuna vanadiiniin. Sinkkivirtausakuilla on parempi energitiheys kuin vanadiinivirtausakuilla, mikä tekee sinkistä houkuttelevamman materiaalin virtausakkuihin. Sinkki on materiaalin saatavuuden kannalta tarkasteltaessa parempi vaihtoehto. (Zhang et al. 2019, 493–495.)

4 Kierrätys

Kiinteiden energiavarastojen kierrättäminen on keskeinen osa kestävästä tulevaisuudesta. Kiinteiden energianvarastointijärjestelmien eliniät ovat pitkiä, etenkin vesipumppulaitoksilla, mutta niiden kierrätyksestä tulee silti huolehdittava elinkaaren lopussa. Materiaalien kierrätys vähentää uusien raaka-aineiden tarvetta ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Kestävät kierrätysprosessit ovat tärkeitä, jotta voidaan ympäristövaikutusten minimoimiseksi.

4.1 Akkumateriaalien kierrätys

Litiumin tarpeen on ennustettu kasvavan 1,3 miljoonaa kilogrammaa vuoteen 2040 mennessä. Litiumin kysynnän kasvaminen on tehnyt litiumista kriittisen raaka-aineen EU:n mukaan. Litiumin tuotantoon liittyy geopolittinen riski, koska Kiina, Argentiina ja Chile vastaavat 85 % metallin jalostuksesta. IEA on myös arvioinut litiumin hinnan vaihtelun olevan suurempi kuin muilla keskeisillä mineraaleilla. Nämä seikat pakottavat yrityksiä kehittämään kierrätysmenetelmiä ja panostaan metallien jalostukseen paikallisesti. Euroopan huoltovarmuuden kannalta on hyvin tärkeää myös, että litiumiin ei liittyisi geopolittista riskiä. Etenkin, kun litiumioniakut tarjoavat tällä hetkellä parhaat ratkaisut sähköautoihin, puhelimiin sekä akullisiin energiavarastoihin. Myös muiden akuissa käytettävien materiaalien, kuten koboltin, grafiitin ja nikkelin kysynnän ennustetaan ylittävän tarjonta tulevaisuudessa. (IEA 2024a.)

Akkumateriaalien kierrätyksestä täytyy olla kaupallisesti kannattavaa, jotta yritykset investoivat siihen. IEA:n raportin mukaan nikkelin ja koboltin kierrätys kasvoi 40 % ja litiumin 20 % vuonna 2023. Kyseessä on positiivinen edistys, mutta näiden materiaalien kierrätysmäärät ovat edelleen hyvin alhaisia. Kierrättämällä ei pelkästään saada materiaaleja uusiokäyttöön vaan myös vähennetään kasvihuonekaasupäästöjä, sillä mineraalien louhiminen tuottaa jopa 80 % enemmän päästöjä kuin kierrättämisestä johtuvat kasvihuonekaasupäästöt. (IEA 2024b.)

Nikkelin, litiumin, koboltin ja kuparin kierrätyksen odotetaan nousevan seuraavan 25 vuoden aikana. Kierrättäminen ei kuitenkaan korvaa kaivostointimintaa, mutta vähentää sitä, vähentäen tarvetta louhia uusia materiaaleja yhtä merkittävässä mittaluokassa.

Akkujen kierrätysuhde näkyy kuitenkin viiveellä, sillä akkujen käyttöiät ovat suhteellisen pitkiä. Voidaan puhua jopa 15 vuodesta. Joten tällä hetkellä kierrätyksessä olevat akut ovat pääosin 15 vuotta sitten valmistettuja. Nykyään akkuja valmistetaan enemmän, mikä tulee kasvattamaan kierrätettyjen

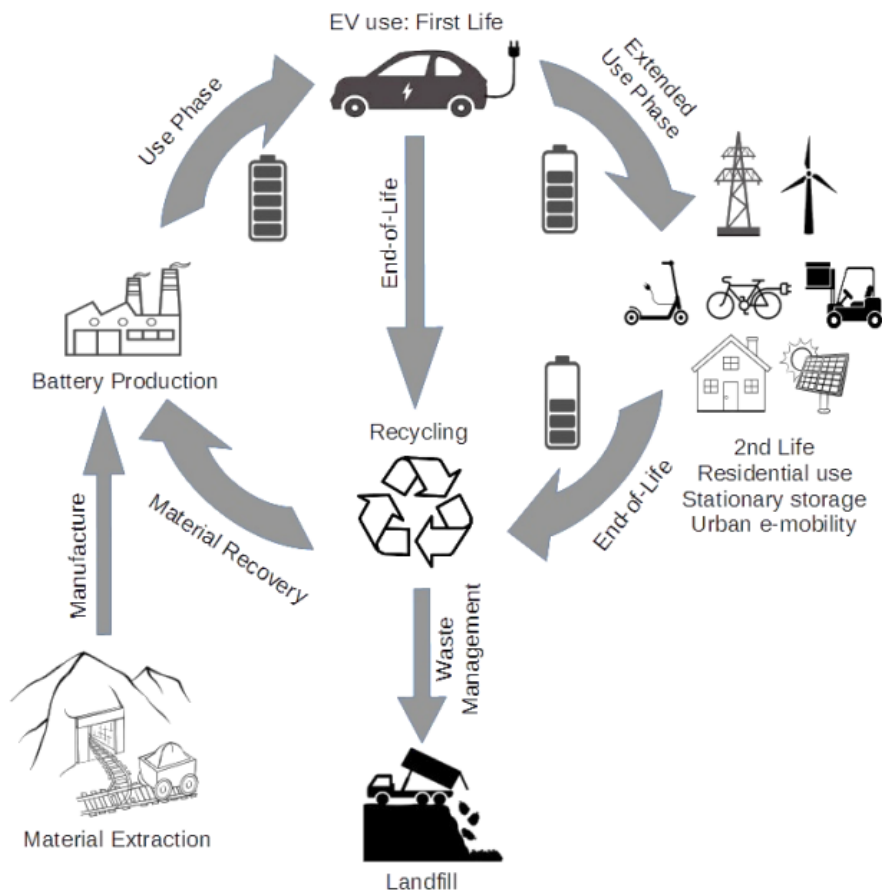
akkumateriaalien määrää tulevaisuudessa. Kansainvälinen energiajärjestö IEA onkin arvioinut, että 0,4 Mt litiumista saataisiin kierrättämällä vuonna 2050. Louhitun litiumin tarve olisi ennustuksen mukaan 1,3 Mt. (IEA 2024b.)

Lyijyakkujen ja nikkelikadmiumakkujen kierrätysuhde on suuri. Lyijyakkujen kierrätysuhde kuitenkin vaihtelee valtioittain todella paljon. Esimerkiksi Norjassa lyijyakkujen kierrätysuhde oli 65 %, kun taas Slovakiassa se oli 95 % vuonna 2022. (Eurostat 2023) Vastaavasti natriumrikkiakkujen kierrätysaste on 99 %. (Pathak, Gupta 2018, 4.)

EU:n mukaan 46 % ostetuista paristoista ja akuista saatiin kierrätettyä. Kierrätettävien akkujen ja paristojen määrä on kasvanut monessa EU-valtiossa viimeisen 13 vuoden aikana. Vuonna 2009 kierrätettävien paristojen ja akkujen määrä oli 50 000 tonnia, kun vuonna 2020 se oli jo 111 000 tonnia. (Eurostat 2023.)

4.2 Sähköautojen akkujen uudelleenkäyttö

Sähköautot ovat olleet esillä viime vuosien ajan, sillä ne vähentävät liikenteessä syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Sähköautojen määrä on kasvanut 17 000 autosta 8,5 miljoonaan autoon 10 vuoden aikana. Sähköautot vaativat tehokkaita akkuja ja kysymys herää, mitä tehdä akuille, joiden kapasiteetti on laskenut liikaa, jotta niitä ei voida käyttää enää sähköautoissa. Kuvan 4. mukaisesti sähköautojen akut voidaan kierrättää tai käyttää uudelleen toisessa käyttökohteessa, kuten kiinteissä energiavarastoissa. (Kotak et al. 2021.)



Kuva 4. Sähköauton akun kiertotalous. (Kotak et al. 2021)

Sähköautojen akut vaihdetaan, kun ne menettävät 20–30 % kapasiteetistaan. Näin ollen akut saavuttavat käytännössä loppunsa ennen kuin akuista on saatu kaikki irti. Akkuja voitaisiin uudelleen käyttää energian varastoinnissa, joka vähentäisi uusien akkujen valmistustarvetta ja näin ollen vähentäisi raaka-aineiden kysyntää, etenkin kriittisten raaka-aineiden kysyntää. Akkujen uudelleenkäytöllä vähennettäisiin myös kasvihuonekaasuja, sillä niin välttyttäisiin ylimääräiseltä louhinnalta. Uudelleenkäyttö antaisi myös lisää aikaa kehittää parempia kierrätysmenetelmiä akuille. (Kotak et al. 2021.)

Akkuteknologiat eivät kuitenkaan ole riittävän standardisoituja, jolloin uudelleenkäyttöön menevät akut voivat erota toisistaan merkittävästi, mikä vaikeuttaa uudelleenkäyttöä. Akkujen kunto sekä suorituskyky voi vaihdella merkittävästi, mikä vaikeuttaa energiavaraston suunnittelua. Tällä hetkellä ei myöskään ole standardisoituja menetelmiä akkujen arviointiin, uudelleenkäyttöön tai käytettyjen akkujen keräämiseen liittyen. Tämä aiheuttaa hieinan haasteita akkujen uudelleenkäytössä käytännön tasolla, mutta siitä huolimatta uudelleenkäyttö vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta. (Kotak et al. 2021.)

5 Tulevaisuuden kehityssuunnat

Teknologiat kehittyvät ja uusia ratkaisuja ja tapoja varastoida energiaa kehitetään jatkuvasti. Tässä luvussa esittelen kaksi lupaavaa teknologiaa. Natriumioniakut lupaavat ympäristöystävällisempää vaihtoehtoa litiumioniaakuille, kun taas kiinteäelektrolyyttiset akut takaavat paremman turvallisuuden ja energiatiheuden verrattuna akkuihin, jotka käyttävät nestemäisiä elektrolyyttejä.

5.1 Natriumioniakut

Litiumioniakut ovat suosituin akkuteknologia ja niitä käytetäänkin sähköautoissa, puhelimissa ja muissa kannettavissa laitteissa. Litiumin kasvava tarve on herättänyt huolta mineraalin saatavuudesta ja näin ollen vaihtoehtoisista materiaaleista valmistettuja akkuja on kehitetty, kuten natriumioniakut. Natriumioniakut olisivat ympäristöystävällisempi vaihtoehto litiumioniaakuille ja natriumin saatavuudesta ei ole ongelmaa. Tämänhetkiset natriumakut ovat sulasuola-akkuja eli ne toimivat todella korkeassa lämpötilassa. Natriumioniakut ovat kuitenkin pitkään olleet kehitteillä ja niiden suurin heikkous on alhainen energiatiheys. Kiinteissä energianvarastointijärjestelmissä energiatiheys ei ole yhtä merkittävä tekijä kuin esimerkiksi sähköautoissa. Näin ollen natriumioniakut vaikuttavat lupaavalta teknologialta kiinteisiin energiavarastoihin. (Ellis, Nazar 2012.)

5.2 Kiinteäelektrolyyttiset akut

Akut tarvitsevat jäähdytyslaitteita, jotta ne eivät ylikuumene. Akun ylikuumentuessa suorituskyky kärsii ja akuista tulee suurempi turvallisuusriski. Akkujen kapasiteetti heikkenee jatkuvien lataus- ja purkusyklien kautta sekä nestemäiset elektrolyytit ovat alttiimpia tulipaloille ja räjähdyksille. Lisäksi, jos akkuun tulee reikä se vuotaa orgaanisista liuottimista valmistetun nestemäisen elektrolyytin maahan, joka on turvallisuusriskin lisäksi ympäristöhaitta. (Kim et al. 2015.)

Kiinteäelektrolyyttisillä akuilla koitetaan ratkaista edellisessä kappaleessa mainittuja ongelmia. Nestemäinen elektrolyytti korvataan kiinteällä materiaalilla, jolloin sillä tulisi olla hyvät mekaaniset ominaisuudet, ionijohtavuus, eikä sen tulisi reagoida helposti akussa käytettävien metallien kanssa. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi litiumnitridit ja sulfidit. (Kim et al. 2015.)

Kiinteäelektrolyyttisten akkujen etuja ovat todella alhainen itsepurkautuminen, korkeampi energiatiheys, tasaisempi lähdejännite ja parempi käyttäjäturvallisuus. Niiden valmiskustannukset ovat kuitenkin korkeita ja niillä on

alhainen tehotehiheys, jolloin ne eivät sovi suurta tehoa tarvittaviin käyttökohteisiin, kuten energiapiikkien tasaamiseen. (Kim et al. 2015.)

6 Johtopäätökset

Tutkielman tarkoituksena oli perehtyä yleisimpien kiinteiden energianvarastointijärjestelmien suorituskykyyn ja materiaalivaatimuksiin, erityisesti materiaalien saatavuuden näkökulmasta. Työssä tutkittiin myös, kuinka kierrätys vaikuttaa materiaalien saatavuuteen sekä lisäksi tutustuttiin lupaaviin tulevaisuuden kehityssuuntiin, joissa tutkittiin, mitä ongelmia esimerkiksi natriumioniakut voivat ratkaista.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella vakiintuneet energianvarastointitekniikat, kuten paineilmaenergiavarastot ja vesipumppulaitokset ovat hyviä ratkaisuja energian varastointiin, mutta paineilmaenergiavarastojen hyötysuhde tulee parantaa, jotta se olisi kannattavaa verrattaessa akkuihin ja vesipumppulaitoksiin. Uusiutuvan energian tuotannon kasvu ja akkujen yleistyminen ovat yhdessä johtaneet energiavarastojen kysynnän kasvuun. Akuilla on hyvä tehokkuus ja nopea vasteaika, mikä tekee niistä hyvän vaihtoehdon kiinteisiin energianvarastointijärjestelmiin.

Kiinteiden energianvarastointijärjestelmien suunnittelussa tulee käyttää kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa otetaan huomioon varastointitekniikan suorituskyky, hinta, turvallisuus, materiaalien saatavuus, geopoliittiset riskit ja kierrätyspotentiaali.

Eri energian varastointitekniikat asettavat erilaisia vaatimuksia tarvittaville materiaaleille. Mekaaniset energiavarastot, kuten pumppuvoimalaitokset, CAES ja vauhtipyörät käyttävät enemmän perinteisiä rakennusmateriaaleja, kuten betonia ja terästä, pois lukien vauhtipyörien magneettisissa laakereissa käytettävä neodyymi. Näiden materiaalien saatavuudessa ei ole ongelmaa. Sähköisistä energianvarastointiratkaisuista SMES on ainoa, joka vaikuttaa lupaavalta, mutta sen käyttöönotto suuren luokan energianvarastointijärjestelmissä ei ole kustannustehokasta ja näin ollen se ei ole tällä hetkellä järkevää.

Akut sisältävät useita kriittisiä materiaaleja, kuten litiumia, kobolttia, nikkeä, grafiittia ja vanadiinia, joiden kysynnän ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa kuvan 3. mukaisesti. Energiavarastot suosivat edullisia, pitkän käyttöiän ja hyvän syklinkestävyyden omaavia akkuja, kuten LFP-akkuja. Tämä voi vähentää riippuvuutta kalliista ja mahdollisesti tulevaisuudessa heikosti saatavilla olevista materiaaleista, kuten koboltista. LFP-akut ovat tällä hetkellä paras vaihtoehto akkupohjaisiin energiavarastoihin hyvän syklinkestävyyden, pitkän käyttöiän ja kustannustehokkuuden kannalta. Lisäksi LFP-akuissa käytetään vähemmän kriittisiä materiaaleja kuin esimerkiksi LCO-akuissa, sillä litium on ainoa LFP-akuissa käytettävä kriittinen materiaali, kun taas fosfori ja rauta eivät ole. Näin ollen LFP-akut ovat materiaalin

saatavuuden kannalta parempi vaihtoehto verrattuna muihin akkuteknologioihin.

Lyijyakut ovat myös hyvin vakiintunut teknologia. Ne ovat myös kustannustehokkaita ja niiden kierrätysuhde on korkea. Lyijyakuissa käytetyt materiaalit eivät ole kriittisiä, mutta niiden suorituskyky ja operointi tekevät niistä vähemmän houkuttelevia verrattuna litiumioniakkuihin.

Materiaalien saatavuus tulee olemaan keskeinen haaste energianvarastoinnissa sekä sähköautoissa. Akuista litiumioniakut tarjoavat tällä hetkellä parhaan energianvarastointiratkaisun, sillä ne tarjoavat hyvän syklinkestävyyden, energiatihedden ja suorituskyvyn, mutta ne sisältävät kuitenkin kriittisiä metalleja, kuten litiumia, kobolttia ja nikkeliä, joiden kierrätys on vielä suhteellisen alhaista, eikä kierrätys korvaa kokonaan niiden tarvetta neitseellisistä raaka-aineista. Lisäksi sähköautojen akkujen uudelleenkäyttö kiinteissä energianvarastointijärjestelmissä vaikuttaa lupaavalta. Toisaalta uudelleenkäyttö edellyttää standardisointia ennen kuin se voidaan ottaa laajasti käyttöön.

Haasteista huolimatta akkujen käyttö energian varastoinnissa vaikuttaa lupaavalta. Kuitenkin mekaaniset energianvarastointimenetelmät, kuten vesipumppulaitokset ja paineilmaenergiavarastot ovat tehokkaita, ja niillä on pitkä käyttöikä sekä suuri kapasiteetti, joten niiden käyttö jatkossakin energian varastoinnissa on kannattavaa. Tämän takia ne ovat edelleen hyviä tapoja varastoida energiaa. Akkujen yleistymisen energian varastoinnissa ei tarkoita sitä, että muut teknologiat jäävät historiaan, sillä varastointiteknologioita voidaan yhdistää ja käyttää rinnakkain käyttökohteen mukaan. Vauhtipyöriäkin tarvitaan tehon tasaamiseen ja sähköverkon jännitteen ylläpitämiseen.

Kehitteillä olevista akkuteknologioista natriumioniakut vaikuttavat lupaavalta natriumin runsaan saatavuuden, kustannustehokkuuden sekä ympäristöystävällisyyden takia. Natriumioniakut vaativat lisää tutkimusta, jotta ne voidaan ottaa käyttöön kaupallisessa mittakaavassa.

Lähteet

Adetokun, B. B. & Oghorada, O. & Abubakar, S. J. (2022). Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*. Vol. 55. art no 105663. Saatavissa: DOI 10.1016/j.est.2022.105663.

Amiryar, M. E. & Pullen, K. R. (2017). A Review of Flywheel Energy Storage Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*. Vol. 7:3. S. 286. Saatavissa: DOI 10.3390/app7030286.

EASE (European Association for Storage of Energy). (2018). Sodium-Sulphur (NaS) Battery. Saatavissa: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2018/09/2018.07_EASE_Technology-Description_NaS.pdf. Viitattu 29.3.2025.

Ellis, B. L. & Nazar, L. F. (2012) Sodium and sodium-ion energy storage batteries. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. Vol. 16:4. S.168-177. Saatavissa: DOI 10.1016/j.cossms.2012.04.002.

Eurostat. (2023). Waste Statistics – recycling of batteries and accumulators. Saatavilla: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_recycling_of_batteries_and_accumulators#Recycling_efficiency_for_other_batteries. Viitattu 30.3.2025.

Fan, X. & Liu, B. & Liu, J. & Ding, J. & Han, X. (2020). Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. *Transactions of Tianjin University*. Vol. 26. S.92-103. Saatavissa: DOI 10.1007/s12209-019-00231-w.

Hameer, S. & van Niekerk, J. L. (2015). A review of large-scale electrical energy storage. *International Journal of Energy Research*. Vol.39. S. 1179–1195. Saatavissa: DOI 10.1002/er.3294.

Hoff, C. M. (2022) *Energy Storage Technologies and Applications*. 1. painos. Artech House. 311 s. ISBN 9781630819095.

IEA (2024a). Lithium. International Energy Agency Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/lithium>. Viitattu 30.3.2025.

IEA (2020). The 2020 EU Critical Raw Materials List. International Energy Agency. Saatavissa: <https://www.iea.org/policies/15274-the-2020-eu-critical-raw-materials-list>. Viitattu 30.3.2025.

IEA (2023). The role of critical minerals in clean energy transitions: Mineral requirement for clean energy transitions. International Energy Agency. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/mineral-requirements-for-clean-energy-transitions> Viitattu 30.3.2025.

IEA (2024b). Recycling of Critical Minerals. International Energy Agency. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals>. Viitattu 30.3.2025.

IEA (2025). Renewables. International Energy Agency. Saatavissa: <https://www.iea.org/energy-system/renewables>. Viitattu 20.4.2025.

Kebede, A. A. & Kalogiannis, T. & Van Mierlo, J. & Berecibar, M. (2022). A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Review*. Vol. 159. Art. no. 112213. Saatavissa: DOI 10.1016/j.rser.2022.112213.

Kim, J. G. & Son, B. & Mukherjee, S. & Schuppert, N. & Bates, A. (2015). A review of lithium and non-lithium based solid state batteries. Vol. 282. S. 299-322. Saatavissa: DOI 10.1016/j.jpowsour.2015.02.054.

Kotak, Y. & Marchante Fernando, C. & Canals Casals, L. & Kotak, B. S. & Geisbauer, C. e.m. (2021). End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies*. Vol. 14:8. Art. no. 2217. Saatavissa: DOI 10.3390/en14082217.

Moseley, P. T. & Garche, J. (2014). *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. 1. painos. Elsevier. 493 s. ISBN 9780444626103

Nitta, N. & Wu, F. & Lee, J. T. & Yushin, G. (2015). Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*. Vol. 18:5. S.252-264. Saatavissa: DOI 10.1016/j.mattod.2014.10.040.

Pathak, P. K. & Gupta, A. R. (2018). Battery Energy Storage System. International Conferen on "Computational Intelligence and Communication Technology". Vol. 4. Saatavissa: DOI 10.1109/CIACT.2018.8480377

Porzio, J. & Scown, C. D. (2021). Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. *Advanced Energy Materials*. Vol. 11:33. Art. no. 2100771. Saatavissa: DOI 10.1002/aenm.202100771.

Rabi, A. M. & Radulovic, J. & Buick, J. M. (2023). Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies. *Thermo*. Vol. 3:1. S. 104–126. Saatavissa: DOI 10.3390/thermo3010008.

Zhang, H. & Lu, W. & Li, X. (2019). Progress and Perspectives of Flow Battery Technologies. *Electrochemical Energy Reviews*. Vol. 2:3. S. 492-506. Saatavissa: DOI 10.1007/s41918-019-00047-1.