

# **Superkondensaattorit – Kestävän kehityksen energianvarastointilaitteet**

Materiaalikemian tutkimusryhmä  
Kemian laitos  
Turun Yliopisto  
LuK -tutkielma

Laatija:  
Katariina Varpio

17.4.2024  
Turku

LuK -tutkielma

**Oppiaine:** Kemia

**Tekijä(t):** Katariina Varpio

**Otsikko:** Superkondensaattorit – Kestävän kehityksen energianvarastointilaitteet

**Ohjaaja:** Pia Damlin

**Sivumäärä:** 25 sivua

**Päivämäärä:** 17.4.2024

Superkondensaattorit ovat energianvarastointilaitteistoja, joilla on nopea latautumis- ja purkautumiskyky, pitkä käyttöikä sekä korkea tehoteho. Niiden ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa muun muassa toimintaperiaatteen, elektrodimateriaalin sekä elektrolyytin avulla. Tällä hetkellä tutkitaan laajasti vihreitä elektrodimateriaaleja, kuten biomassapohjaisia hiilimateriaaleja, joilla voitaisiin vähentää valmistusprosessien negatiivisia ympäristövaikutuksia. Vaikka vihreiden materiaalien kaupallistamisessa on vielä haasteita, superkondensaattorit ovat kestävän kehityksen näkökulmasta hyvin lupaavia energianvarastointilaitteistoja sekä niiden kestävien materiaalien, että niiden sovelluskohteiden ansiosta.

Superkondensaattorit ovat lupaava sovellus nykyinfrastruktuurimme epäkohtiin erityisesti energiatuotannossa ja liikenteessä. Niillä on esimerkiksi suuri potentiaali edistää uusiutuvien energialähteiden integraatiota nyky maailmaan sekä kyky toimia pääenergiavarastona erilaisissa julkisen liikenteen kulkuvälineissä. Tällä tavoin ne voivat vähentää energiateknologiamme tämänhetkistä riippuvuutta perinteisistä fossiilisista polttoaineista, ja tukea siirtymää kohti kestävämpiä energianmuotoja. Kaiken kaikkiaan superkondensaattorit mahdollistavat erilaisten energijärjestelmien tehokkaamman sekä luotettavamman käytön. Jatkuvan tutkimuksen avulla niiden optimointi taloudellisesti ja kestävän kehityksen kannalta on entistäkin realistisempaa.

**Avainsanat:** Superkondensaattori, energianvarastointilaitteisto, vihreät materiaalit, kestävä kehitys

# Sisällysluettelo

<b>Lyhenteet</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Superkondensaattoreiden perusteet</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Toimintaperiaatteet ja luokittelu</b>	<b>7</b>
2.1.1 Kaksikerroksiset kondensaattorit, EDLC	7
2.1.2 Pseudokondensaattorit	7
2.1.3 Hybridikondensaattorit	8
<b>2.2 Kestävät materiaalit</b>	<b>8</b>
2.2.1 Elektrodimateriaalit	9
2.2.2 Elektrolyytit	11
2.2.3 Materiaalien analyysitekniikat	12
<b>2.3 Kierrätettävyydestä</b>	<b>12</b>
<b>3 Sovelluskohteet kestävässä maailmassa</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Liikenne</b>	<b>14</b>
3.1.1 Julkinen liikenne	15
3.1.2 Henkilöautot	16
<b>3.2 Uusiutuvan energian voimalat</b>	<b>18</b>
3.2.1 Tuuli- ja vuorovesivoimalat	18
3.2.2 Aurinkovoimalat ja aurinkokennojen virtapiirit	19
<b>4 Johtopäätökset</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Tulevaisuuden näkymät</b>	<b>22</b>
<b>Lähteet</b>	<b>24</b>

## Lyhenteet

EDLC – kaksikerroksinen kondensaattori (engl. electric double-layer capacitor)

redox-reaktio – hapetus-pelkistys-reaktio

HESS – Hybridienergianvarastointijärjestelmä (engl. hybrid energy storage system)

EU – Euroopan Unioni

CV – Syklinen voltametria (engl. cyclic voltametry)

EIS – elektroninen impedanssispektroskopia

GCD – galvanostaattinen syklaus (engl. galvanostatic charge/discharge)

TEABF<sub>4</sub> - Tetraetyyliammoniumtetrafluoriboraatti

LiTFSI – Litiumbis(trifluorimetaanisulfonyyli)imidi

EDL – kaksoiskerros (engl. electric double layer)

DC – Tasavirta (engl. direct current)

RoHS – Elektroniikkaa koskeva vaarallisten aineiden käyttörajoitus (engl. Restriction of hazardous substances in electrical and electronic equipment)

# 1 Johdanto

Paine siirtyä pois fossiilisista polttoaineista erilaisiin uusiutuviin energianlähteisiin on ollut suuri erityisesti viimeisien vuosikymmenien aikana. Maisemakuvaan on noussut tuulivoimaloita ja rakennusten katoilla on aurinkopaneeleja, tuottamassa puhdasta sähköenergiaa. Uudet energiantuotantomuodot ovat kuitenkin nostaneet esille myös ongelmia nykyinfrastruktuurissa. Tällä hetkellä vain osa tuotetusta uusiutuvasta sähköenergiasta saadaan hyödynnettyä, sillä energian varastointi- ja talteenottomenetelmissä on puutteita. On huomattu suuri tarve uudentlaisille energianvarastointilaitteistoille, joiden avulla kaikki uusiutuva energia saataisiin mahdollisimman tehokkaasti hyödynnettyä. Superkondensaattorit ovat energianvarastointilaitteita, joita on kehitelty muun muassa juuri tähän tarkoitukseen.

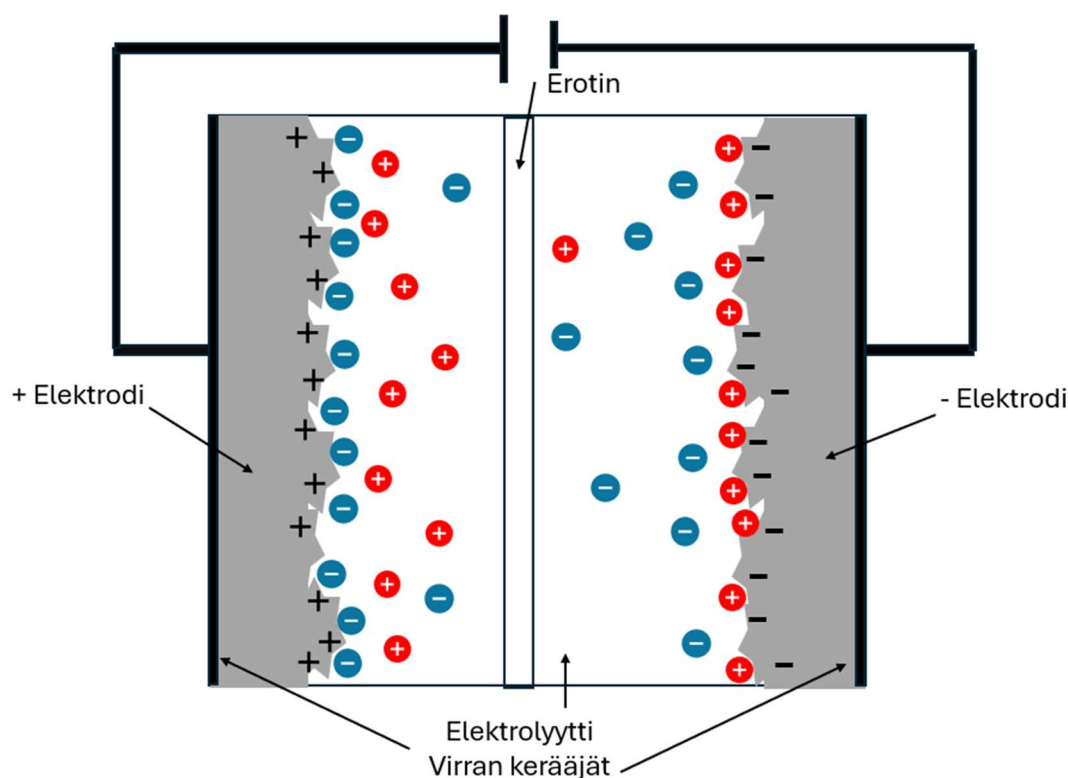
Superkondensaattoreiden ominaisuuksia voidaan säädellä esimerkiksi niissä käytettävien materiaalien kautta. Materiaalivaihtoehtoja on monia, ja tällä hetkellä tutkimus keskittyy paljon vihreisiin ja tulevaisuuden kannalta kestäviin materiaaleihin. Materiaaleilla tulisi olla uusiutuvat lähtöaineet, energiatehokkaat synteetit, pitkät käyttöiät sekä hyvät kierrätys- ja uusiokäyttömahdollisuudet. Tämän lisäksi niiden tulisi tietysti olla sopivia haluttuihin sovelluksiin ja vähintäänkin yhtä toimivia kuin nykyiset materiaalivaihtoehdot.

Superkondensaattorit erottuvat muista varastointilaitteista, kuten akuista, erityisesti niiden lataus- ja purkautumisnopeudessa sekä suuressa tehotehdydessä<sup>1</sup>. Tehotehdyys tarkoittaa säilöttävää energianmäärää yhtä massayksikköä kohti. Tämän lisäksi niiden mekanismit perustuvat reversiibleihin, eli palautuviin ilmiöihin, ja näin niiden käyttöikä on huomattavasti pidempi kuin esimerkiksi laajasti käytettyjen litiumioniakkujen<sup>1</sup>. Muun muassa nämä ominaisuudet mahdollistavat niiden toimimisen usealla energiasektorin osa-alueella erilaisissa sovelluksissa. Vihreämmät ratkaisut erityisesti liikenne- ja energiasektorilla olisi hyvin merkittäviä ympäristön kannalta, sillä nämä sektorit aiheuttavat tällä hetkellä Suomessa eniten kasvihuonepäästöjä<sup>2</sup>.

Tässä tutkielmassa käsitellään superkondensaattoreiden vihreitä materiaaleja sekä käytössä olevien materiaalien kierrätettävyyttä. Tämän lisäksi tarkastellaan superkondensaattoreiden tehtäviä eri sovelluskohteissa ja niiden tuomia mahdollisuuksia luoda yhteiskunnasta yhä energiatehokkaampi ja kestävämpi.

## 2 Superkondensaattoreiden perusteet

Superkondensaattorit koostuvat kahdesta elektrodista, niiden välisestä erottimesta, elektrolyytistä sekä metallisista virranottimista<sup>1</sup>. Kuvassa 1 on esitelty tällainen rakenne. Kaksielektrodikennojen lisäksi tutkimuksessa käytetään myös kolmielektrodikennoja<sup>1</sup>. Kolmas elektrodi toimii referenssielektrodina, joka parantaa tutkimustulosten tarkkuutta, mutta sovelluksissa tällaiseen tarkkuuteen ei ole tarvetta<sup>1</sup>. Tässä tutkielmassa keskitytään tämän takia vain kaksielektrodikennoihin.



Kuva 1: Superkondensaattorin perusrakenne

Superkondensaattorit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan niiden toimintaperiaatteen mukaan: Kaksikerroksiset kondensaattorit (engl. electric double layer capacitor, EDLC), pseudokondensaattorit ja hybridikondensaattorit<sup>1</sup>. Superkondensaattoreissa esiintyvät mekanismit ovat riippuvaisia virrasta, ja hyvin reversiibeilitä<sup>1</sup>. Tämä tekee laitteistoista myös hyvin kestäviä. Kaupallisissa superkondensaattoreissa on keskimäärin 500 000–1 000 000<sup>3</sup> käyttösykliä, joka mahdollistaa myös pidemmän käyttöiän kuin esimerkiksi litiumioniakuilla. Superkondensaattoreiden tehokkuus on riippuvainen muun muassa elektrodien pinta-alasta, elektrolyytin ionijohtokyvystä sekä elektrolyytin ja elektrodimateriaalien yhteensopivuudesta.

Superkondensaattoreiden molemmat toimintaperiaatteet ovat pinnalla tapahtuvia ilmiöitä, joiden tehokkuus on tämän takia riippuvainen elektrodin aktiivisesta pinta-alasta. Myös toimintaperiaatteet mahdollistavat hieman eri ominaisuuksia valmistetulle superkondensaattorille. Kaksikerroksisilla kondensaattoreilla on usein pienempi kapasiteetti<sup>1</sup> ja energiatiheys<sup>4</sup>, kuin pseudokondensaattoreilla. Sen sijaan ne ovat kuitenkin usein vakaampia latautuessaan ja purkautuessaan sekä niillä on korkeampi tehosiheys<sup>4</sup>. Hybridisuperkondensaattoreilla on parempi kapasiteetti verrattuna perinteisiin superkondensaattoreihin, mutta niiden tehosiheys ja käyttöikä jää kuitenkin matalammaksi<sup>1</sup>. Sovelluksissa käytetään tällä hetkellä enimmäkseen EDLC:ita<sup>4</sup>.

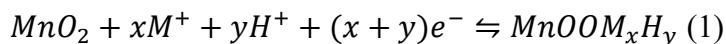
## 2.1 Toimintaperiaatteet ja luokittelu

### 2.1.1 Kaksikerroksiset kondensaattorit, EDLC

EDLC:n kapasitanssi muodostuu ioniadsorption avulla. Kun laitteistoon johdetaan virtaa elektrolyytin kationit adsorptoituvat negatiivisesti varautuneelle elektrodille ja anionit positiivisesti varautuneelle elektrodille. Elektrodin ja viereisen elektrolyytin vastakkaiset varaukset vuorovaikuttavat keskenään, muodostaen kaksoiskerroksen (engl. Helmholtz double layer) niiden rajapintaan, ja näin sähköstaattisesti säilövät energian laitteistoon. Jotta reaktio olisi mahdollisimman tehokas, käytetään elektrodimateriaalina usein huokoista ja suuren pinta-alan mahdollistavia materiaaleja, kuten erilaisia hiilimateriaaleja. Elektrolyytinä taas toimivat usein erilaiset orgaaniset liuokset. Mekanismilla saadaan varastoitumaan virtaa hyvin vakaasti ja vasta virran purkautuessa elektrolyytin ionit liikkuvat elektrodin pinnalta.<sup>1</sup>

### 2.1.2 Pseudokondensaattorit

Pseudokondensaattoreiden eli faradisten superkondensaattoreiden rakenne on samankaltainen, kuin EDLC:n rakenne, mutta elektrodimateriaalit pystyvät redox-reaktioihin, eli hapetus-pelkistysreaktioihin<sup>5</sup>. Tällaisiin materiaaleihin kuuluvat esimerkiksi monet metallioksidit kuten  $MnO_2$  sekä erilaiset sähköä johtavat polymeerit kuten polyaniliini<sup>5</sup>. Näillä materiaaleilla usein pinnoitetaan elektrodit. Kun superkondensaattoriin johdetaan virtaa, pseudokapasitanssi syntyy, nopeiden pinnalla tapahtuvien redox-reaktioiden ansiosta<sup>5</sup>. Energia varastoituu sähkökemiallisesti, kunnes virran purkautuessa laitteistosta redox-reaktiot palautuvat lähtötilanteeseen<sup>5</sup>. Esimerkiksi  $MnO_2$  elektrodilla tapahtuvan redox-reaktio tapahtuu reaktioyhtälön (1) mukaisesti.



Kaavan  $M^+$  on elektrolyytin kationi, jonka adsorptioon virran varastoituminen perustuu. Esimerkiksi KCl on käytetty elektrolyytti, jolloin ioni olisi  $K^+$ -ioni<sup>5</sup>.

### 2.1.3 Hybridikondensaattorit

Hybridisuperkondensaattoreissa EDLC ja pseudokondensaattorin toimintaperiaatteet yhdistyvät ja tapahtuvat samanaikaisesti<sup>1</sup>. Ne koostuvat kahdesta, eri mekanismeilla toimivasta, elektrodista: toinen toimii kuten EDLC:n elektrodi ja toinen kuten pseudokondensaattorin elektrodi<sup>1</sup>. Elektrolyytit tällaisissa systeemeissä ovat yleensä joko orgaanisia tai vesipohjaisia<sup>1</sup>. Eri mekanismit mahdollistavat sen, että redox-reaktioon kykenevä elektrodi parantaa energiatiheyttä, kun taas ei-faradinen elektrodi parantaa latautumis- ja purkautumisvakautta sekä tehosiheyttä<sup>1</sup>.

Superkondensaattoreista, joissa hyödynnetään kahta erilaista elektrodia, käytetään myös nimeä epäsymmetrinen superkondensaattori. Symmetrisellä superkondensaattorilla taas viitataan laitteistoon, jossa molemmat elektrodit ovat samanlaisia.<sup>1</sup>

## 2.2 Kestävät materiaalit

Superkondensaattorimateriaaleja on useita. Valinta tehdään haluttujen ominaisuuksien sekä erityisesti sovelluksissa myös edullisuuden mukaan. Kestävyys ja ympäristöystävällisyys ovat nykyään painotettuja arvoja, jonka takia vihreitä elektrodimateriaaleja ja elektrolyyttejä tutkitaan paljon.

Eniten superkondensaattorin ominaisuuksiin vaikuttaa elektrodimateriaalit. Yleisin näistä on hiili<sup>4</sup>, jota käytetään kaksikerroksisissa kondensaattoreissa. Aine on stabiilia, sillä on hyvä sähkönjohtokyky sekä sen ominaisuudet ovat helposti muokattavissa<sup>4</sup>. Erityisesti aktiivihiiiltä käytetään sovelluksissa paljon sen halvan tuotannon takia, vaikka muut hiilimateriaalit, kuten nanoputket ja grafeeni toimivat sähkökemiallisesti sitä toivotummin<sup>4</sup>. Hiilipohjaisten materiaalien valmistuksessa on ryhdytty tutkimaan biomassan hyödyntämistä<sup>6</sup>.

Pseudokondensaattorimateriaaleja ovat esimerkiksi erilaiset metallioksidit ja sähköä johtavat polymeerit. Metallioksidit ovat yleisesti hyvin ympäristöystävällisiä, sillä ne ovat kemiallisesti vakaita, eivätkä sisällä haitallisia aineita<sup>7</sup>. Metallioksidi-biohiili-komposiitti on myös nostattanut huomiota, sillä hiili luo kestävän ja stabiilin pohjan elektrodille, kun taas metallioksidit parantavat pinta-alaa, katalyyttistä aktiivisuutta sekä sähkönjohtokykyä<sup>8</sup>.



Elektrolyytin tehtävä on toimia ionien kuljettajana kahden elektrodin välillä<sup>9</sup>. Ionien johtokyky vaikuttaa merkittävästi superkondensaattorin tehokkuuteen sekä lataus- ja purkausnopeuteen, minkä takia elektrolyyteillä on usein korkea konsentraatio<sup>8</sup>. Vesipohjaiset suolaliuoselektrolyytit ovat ympäristöystävällisiä ja todella turvallisia, mutta niiden haasteena on muun muassa niiden suppeampi sähkökemiallinen ikkuna<sup>8</sup>. Sähkökemiallinen ikkuna viittaa elektrolyytin potentiaalialueeseen, jolla ei tapahdu faradista reaktiota.

### 2.2.1 Elektrodimateriaalit

Hiilipohjaiset materiaalit ovat todella yleisiä superkondensaattoreissa, sillä hiili on stabiilia, johtaa hyvin sähköä, sekä sillä voidaan sen huokoisuuden ansiosta muodostaa rakenteita, joilla on suuri aktiivinen pinta-ala. Hiilimateriaaleja käytetään erityisesti kaksikerroksisten kondensaattoreiden elektrodeissa, sillä ne eivät kykene redox-reaktioihin. Tutkittuja hiilen muotoja superkondensaattoreissa ovat esimerkiksi grafeeni, aktiivihiihi, aerogelit, nanoputket ja karbidijohdannainen hiili<sup>4</sup>. Aktiivihiihi on hiilimateriaaleista sovelluksissa käytetyin sen edullisen valmistusprosessin takia<sup>4</sup>.

Monien hiilimateriaalien, kuten aktiivihiihen, valmistus alkaa hiilirikkaan lähtöaineen hiillostamisella<sup>4</sup>. Lähtöaineena voi toimia joko mineraalit tai biomassa. Biomassan tutkiminen ja käyttö on lisääntynyt luonnollisten mineraalien vähentymisen ja niissä esiintyvien valmistusprosessin saantoa laskevien sivuaineiden takia<sup>4</sup>. Ympäristön säästäminen ja kierrätys ovat hyvin keskeisessä asemassa biomassatutkimuksessa. Biohiiltä voidaan valmistaa esimerkiksi kasvipohjaisista materiaaleista kuten teeledistä<sup>10</sup>, bambukuidusta<sup>11</sup> ja sokeriruokojätteestä<sup>12</sup> tai eläinpohjaisista materiaaleista kuten muurahaisjauheesta<sup>13</sup>, kanamunan kuorista<sup>14</sup> ja katkaravun kuorista<sup>15</sup>, joita lähdetään kierrättämään. Biomassa on ympäristöystävällisempi, halvempi ja helpommin saatavilla oleva vaihtoehto hiilen lähtöaineeksi<sup>4</sup>. Jätteen hiillyttäminen tarvittavaksi biohiileksi onnistuu monilla eri tavoilla, riippuen muun muassa käsiteltävän jätteen koostumuksesta, kosteudesta ja lopputuotteen toivotuista ominaisuuksista<sup>6</sup>. Esimerkiksi pyrolyysiä eli kuivatislausta, kaasutusta ja torrefointia eli polttamista voidaan käyttää biohiilen valmistuksessa<sup>6</sup>.

Ongelmana biomassan soveltamisessa on kuitenkin ollut toistettavuus<sup>4</sup>. Monia erilaisia jätteitä on tutkittu ja usein ne tarvitsevat hyvin erilaiset muokkausmenetelmät, jotta ne saadaan käytettäväksi biohiileksi. Valittaviin menetelmiin vaikuttaa alkuperäisen jätteen koostumus ja valmistettavan materiaalin käyttötarkoitus, mikä hankaloittaa yksittäisten menetelmien kaupallistamista<sup>4</sup>. Sen lisäksi, että eri jätteet tarvitsevat eri käsittelytapoja, on

myös samanlaisen jätteen kesken huomattu selkeää vaihtelevuutta<sup>4</sup>. Biomassan kaupallistamisen suurimpia haasteita on tämän takia toistettavuus. Haasteista huolimatta biohiilellä on suuri potentiaali ja ideaalissa tapauksessa se voi jopa yksinkertaistaa materiaalin valmistusprosessia, kuten Zhai ja kumppanit ovat huomanneet hiilipohjaisten tyypellä seostettujen aerogeelien valmistuksessa kitosaanin avulla<sup>16</sup>. He pystyivät ohittamaan valmistusprosessissa typen erillisen seostaminen, sillä kitosaanin avulla saadaan suoraan tyyppitaisia hiiliaerogeeliejä<sup>16</sup>. Yleensä materiaalin valmistuksessa käytetään in situ synteesiä, jonka jälkeen sitä käsitellään muun muassa seostamalla tyyppiä<sup>17</sup>. Typen seostamisella tavoitellaan parempia sähkökemiallisia ominaisuuksia<sup>17</sup>. Biomassaa on onnistuneesti sovellettu aktiivihiiilen ja hiilipohjaisten aerogeelien lisäksi esimerkiksi sipulirakenteisen hiilen (engl. onion-like carbon) valmistuksessa<sup>4</sup>.

Metallioksidit ovat toinen yleinen elektrodimateriaali superkondensaattoreissa. Niitä käytetään erityisesti pseudokondensaattoreissa, sillä metallioksidoilla on useita hapetuslukuja, jotka mahdollistavat hapetus-pelkistysreaktiot. Suurin osa niistä ovat myös myrkyttömiä, vakaita sekä edullisia valmistaa<sup>8</sup>. Elektrodeissa voidaan käyttää monia eri metalleja, haluttujen ominaisuuksien mukaan, mutta yleisimpiä ovat muun muassa mangaani, rutenium ja koboltti<sup>7</sup>. Käytetyimmät valmistustavat voidaan jakaa kolmeen luokkaan: fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin menetelmiin. Fysikaalisiin menetelmiin kuuluvat muun muassa laser pyrolyysi ja fysikaalinen höyrypinnoitus. Kemiallisiin tapoihin kuuluu kemikaalinen hydroterminen höyrypinnoitus ja polyoli synteesi. Vihreimpiä tapoja valmistaa metallioksidinanomateriaaleja ovat kuitenkin biologiset menetelmät<sup>7</sup>. Tällöin synteesissä ei käytetä ylimääräisiä kemikaaleja, reagensseja tai korkea energisiä synteesimenetelmiä<sup>7</sup>. Sen sijaan biogeeninen synteesi on usein halpa, vähäenerginen ja kemikaaliton, joka toimii hyvin kustannustehokkaasti, ekologisesti, ja saanto on usein hyvä<sup>7</sup>. Käytössä on tällöin biologisia aineita, kuten entsyymejä ja eri kasvien uutteita, joita voidaan käyttää reagensseina metallisuolojen kanssa. Esimerkiksi *Prunus dulcis* kasvin avulla Anand et al. pystyivät valmistamaan ZnO-nanopartikkeleita, joista saatiin toimiva superkondensaattorielektrodi<sup>7</sup>.

Metallioksidi-biohiili-komposiitin avulla on saatu paranneltua erityisesti metallioksidielektrodien sähkönjohtokykyä, ionidiffuusiota, kapasitanssia ja vakautta<sup>8</sup>. Ionidiffuusio tarkoittaa konsentraatioeroista johtuvaa ionien liikettä superkondensaattorissa. Komposiitin parantuneen johtokyvyn ansiosta laitteiston sisäinen resistanssi laskee, joka mahdollistaa suuremman sähkön ulosannon<sup>8</sup>. Materiaalin synteesi voi perustua esimerkiksi kyllästyksen, yhteissaostukseen tai hydrotermisiin menetelmiin, mutta teolliseen valmistukseen sopivaa keinoa etsitään vielä<sup>8</sup>. Monia eri biomassalähteitä ja metalleja on

yhdistelty elektrodimateriaalin tutkimuksessa, mutta korkeita kapasitansseja on saatu esimerkiksi NiO-teelehti-, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-vehnänolki- ja MnO<sub>2</sub>-luonnollinen pellavankuituelektrodeilla<sup>8</sup>. Materiaalien ja mekanismien syvällisempi ymmärtäminen on kriittistä niiden optimoinnin kannalta.

## 2.2.2 Elektrolyytit

Kaikista superkondensaattorista löytyy elektrolyytti. Hyvän elektrolyytin täytyy toimia laajalla lämpötilaskaalalla, olla sähköä johtava sekä stabiili<sup>9</sup>. Lisäksi elektrolyytillä tulee olla sovellettava sähkökemiallinen ikkuna<sup>9</sup>. Yleisimmät elektrolyyttityypit ovat vesipohjaiset elektrolyytit, jotka usein jakautuvat happamiin, neutraaleihin ja alkaliisiin liuoksiin. Käytetyimmät näistä ovat kaliumhydroksidi ja rikkihappo. Tämän lisäksi yleisiä ovat orgaaniset elektrolyytit kuten TEABF<sub>4</sub>/propyleenikarbonaatti ja LiTFSI()/asetonitriili, ioniset nesteet (engl. ionic liquids), kiinteät elektrolyytit sekä semi-kiinteät (engl. Quasi-solid) elektrolyytit kuten kuiva- ja geelipolymeerit<sup>9</sup>. Elektrolyytin valinnassa on tärkeää ottaa huomioon myös elektrodimateriaali. Elektrolyytti ei saa reagoida elektrodimateriaalin kanssa, jotta voidaan varmistaa mahdollisimman luotettava ja pitkäkestoinen superkondensaattori. Ei halutut reaktiot johtavat materiaalien nopeampaan kulumiseen, heikompaan tehokkuuteen sekä alentuneeseen kapasiteettiin<sup>7</sup>.

Erityisesti ioniset nesteet ovat kiinnostaneet tutkijoita viime vuosina, sillä niillä on laaja sähkökemiallinen ikkuna ja niiden haihtuminen on vähäistä<sup>9</sup>. Yleisempiä kationeita ja anioneita, joita superkondensaattoreiden elektrolyyteissä käytetään ovat pyridinium-, ammonium-, heksafluorofosfaatti-ionit ja eri halidit kuten kloridi ja bromidi. Ioniset nesteet ovat myös hyvin ympäristöä säästäviä sekä myrkyttömiä, mikä tekee niistä hyvän valinnan ympäristön kannalta<sup>9</sup>. Niiden haasteena on kuitenkin erityisesti niiden korkea viskositeetti sekä sovelluksiin sopivan, tarpeeksi korkean sähkönjohtokyvyn saavuttaminen<sup>5</sup>. Erilaisia elektrolyyttityyppejä on myös yhdistelty elektrolyyttihybrideiksi. Vesipohjaiset geelipolymeerielektrolyytit, kuten natriumkarboksimeetyyliselluloosa/Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ovat yleisiä hybridielektrolyyttejä. Niiden etuina on hyvän ionisen johtokyvyn lisäksi halvat tuotantokustannukset ja ympäristöystävällisyys<sup>9</sup>.

### 2.2.3 Materiaalien analyysitekniikat

Superkondensaattorimateriaalien toiminnan yleisimmät karakterisointitekniikat ovat syklinen voltametria (engl. Cyclic voltammetry, CV), elektroninen impedanssispektroskopia (EIS) ja galvanostaattinen syklaus (engl. Galvanostatic charge/discharge, GCD)<sup>18</sup>. CV:n avulla voidaan tutkia elektrodien ja elektrolyytin sähkökemiallista ikkunaa<sup>18</sup>, lataus-purkautumis-syklin reversiibeliyttä<sup>18</sup>, ominaiskapasitanssia<sup>18</sup> ja kineettisiä parametreja kuten sähkövirran tiheyttä<sup>19</sup>. Sähkövirran tiheys kertoo sähkövirran määrän pinta-alan suhteen, mikä on merkittävää sillä superkondensaattorireaktiot tapahtuvat juuri elektrodien pinnalla. EIS mahdollistaa superkondensaattoreiden virran varastointimekanismin ja kennon virrankuljetuksen tutkimisen<sup>19</sup>. Sen avulla voidaan erityisesti tutkia, mitä elektrolyytin ja elektrodin rajapinnalla tapahtuu. GCD:n avulla voidaan taas arvioida superkondensaattoreiden ominaisuuksia samalla kun siihen syötetään tasavirtaa<sup>18</sup>. Tekniikkaa pidetään luotettavimpana arvioimaan superkondensaattoreiden syklien stabiilisuutta<sup>18</sup>. Samalla datasta voidaan myös selvittää muita haluttuja ominaisuuksia, kuten relaksaatioaikaa sekä teho- ja energiatiheyttä<sup>18</sup>. Relaksaatioajalla viitataan aikaan, joka superkondensaattorilla kestää latautua 63,2 %, jos latausolosuhteet olisivat ideaalit, niin että sitä rajoittaisi vain laitteiston sisäinen resistanssi.

## 2.3 Kierrätettävyys

Superkondensaattoreiden kestävyyttä voidaan tarkastella sen elämänkaaren avulla. Yksi suurimpia ongelmia nykyteknologian valmistuksessa on mineraalien louhinta ja sen aiheuttamat ympäristöongelmat<sup>20</sup>. Ideaalissa tapauksessa materiaaleina voidaan käyttää aiemmin esiteltyjä vihreitä materiaaleja ja mahdollisimman vähäenergisiiä synteesisimenetelmiä. Superkondensaattoreiden käyttöikä on pitkä suuren kertakäyttöiän ansiosta, mutta myös superkondensaattorit kuluvat ja niistä tulee lopulta käyttökelvottomia. Tällöin on tärkeää saada laitteisto kierrätettyä ja materiaalit mahdollisimman tehokkaasti uusiokäyttöön. Nykyteknologian kulutuksessa syntyy paljon teknologiajätettä, jonka kierrätyksessä on vielä paljon haasteita<sup>20</sup>.

Euroopan unionin (EU) asetusten mukaan superkondensaattorit luokitellaan akkujen lailla ongelmajätteeksi<sup>21</sup>. Superkondensaattoreiden materiaaleille ei ole yhtä tiettyä tapaa kierrätykseen, sillä materiaalit voivat poiketa paljon toisistaan. Tämän lisäksi laitteistojen kaupallinen käyttö on melko uutta, jonka takia kierrätyskeinotkin ovat vielä alkuvaiheissa<sup>20</sup>. Superkondensaattoreiden kierrätyksessä on kuitenkin muutamia etuja. Ensinnäkin yleisesti

laitteistoissa ei käytetä esimerkiksi jalometalleja tai muita kriittisiä materiaaleja<sup>20</sup>, joiden talteenottoa tarvitsisi priorisoida, toisin kuin monessa muussa teknologiassa. Materiaalit kuluvat myös hitaasti, eikä mekanismi perustu materiaalien pysyviin muutoksiin, joka tekee materiaalien uusiokäytöstä helpompaa. Tämän lisäksi jo suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa kierrätykseen. Superkondensaattorit voidaan mahdollisuuksien mukaan suunnitella niin, että eri komponentit ovat helpompi erotella toisistaan.

Metallioksidi- sekä hiilielektrodien turvalliset ja vakaat piirteet tekevät niistä helpompia ja turvallisempia loppukäsittelyyn. Yleisimmät elektrolyytit eivät ole herkästi syttyviä, joka lisää turvallisuutta sovelluksissa, mutta myös helpottaa loppukäsittelyä ja mahdollista uusiokäyttöä.

Materiaalien uusiokäyttö ja oikeanlainen kierrätys on hyvin tärkeää kestävyiden kannalta, minkä takia toimivien ja teollistettavien menetelmien tutkimiseen tulisi panostaa, jotta superkondensaattoreiden käyttö olisi tulevaisuudessa mahdollisimman vastuullista.

### 3 Sovelluskohteet kestävässä maailmassa

Superkondensaattoreita on jo kaupallisessa käytössä, vaikka tutkimusta niiden ominaisuuksien parantamiseksi on yhä tehtävä. Niitä on onnistuttu soveltamaan monelle eri osa-alueelle, usein toimien perinteisten akkujen rinnalla tai korvaajana. Esimerkiksi liikenteessä superkondensaattoreita on sijoitettu henkilöautoihin sekä linja-autoihin. Sen lisäksi, että ne voivat toimia joissain tilanteissa akun korvaavana pidempi ikäisenä vaihtoehtona, niiden avulla on myös mahdollisuus kehittää kulkuneuvoista yhä energiatehokkaampia.

Superkondensaattoreilla on myös suuri merkitys uusiutuvan energian keräämisessä ja varastoinnissa. Uusiutuvan energian voimat, kuten aurinko- ja tuulivoimat, ovat usein rakennettu syrjäisille alueille, jossa voi olla hyvin poikkeavat olosuhteet. Superkondensaattorit ovat hyvin kestäviä, ja voivat myös toimia laajalla lämpötilaskaalalla (-40–150 °C)<sup>1</sup>, minkä ansiosta niiden sijoittaminen tällaisille paikoille auttamaan energian keruussa ei ole ongelma. Lisäksi akkupohjaisessa energiankeruujärjestelmässä on ongelmia, kuten tehopiikkien aikainen hidas latautuminen, joka merkittävästi laskee energiantalteenottotehoa, mitä voidaan korjata superkondensaattoreilla.

Superkondensaattoreita on näiden lisäksi hyödynnetty esimerkiksi armeijan välineistössä radiolaitteisiin<sup>22</sup>, valaistukseen<sup>22</sup> ja laser-aseisiin<sup>22</sup>, erilaisessa robotiikassa<sup>23</sup> sekä uutena kehityssuuntana on noussut myös puettava elektroniikka<sup>23</sup>. Tämä tutkielma keskittyy kuitenkin liikenteen ja uusiutuvan energian sovelluksiin, sillä näiden laaja kaupallistaminen vaikuttaisi erityisesti sektoreihin, jotka tuottavat merkittävän määrän sekä Suomen, että koko maailman kasvihuonepäästöistä<sup>2</sup>.

#### 3.1 Liikenne

Liikenteen aiheuttamat kasvihuonepäästöt ovat huomattava osuus koko maailman kasvihuonepäästöistä. Suomessa kotimaan liikenne aiheutti 30 % vuoden 2020 energiasektorin kasvihuonepäästöistä, ollen energiateollisuuden jälkeen (37 %) toiseksi suurin päästölähde sektorilla<sup>2</sup>. Energiasektorin päästöt olivat 72 % Suomen kokonaispäästöistä, eli määrät ovat todella merkittäviä. Päästömääriin on kiinnitetty jo pitkään huomiota ja niitä pyritään vähentämään muun muassa, EU-asetuksilla, kuten asetuksella 2019/631, joka määrittelee uusien henkilöautojen ja kevyiden hyötyajoneuvojen hiilidioksidipäästöstandardeja<sup>24</sup>.

Kasvanut huomio on saanut aikaan esimerkiksi sähköautojen yleistymisen, mutta niiden käytöstä löytyy vielä haasteita. Laajasti käytettyjen litium-ioniakkujen heikkouksia

hybridi- ja sähköautoissa ovat hitaat latausajat, räjähtämisriski törmäyksessä, matala kertakäyttöikä sekä kylmissä lämpötiloissa heikkenevä purkauskyky<sup>25</sup>. Näihin ongelmakohtiin pyritään löytämään ratkaisuja tai korvaavia vaihtoehtoja. Superkondensaattorit eivät voi toimia henkilöautojen pääenergianlähteenä, sillä niiden energiatiheys on liian matala ja jatkuva lataaminen ei olisi käytännöllistä. Liikenteessä on kuitenkin tarvetta energiavarastolle, joka kykenee latautumaan ja purkautumaan nopeasti<sup>26</sup>, mikä on ehdottomasti superkondensaattoreiden suurin etu lähes sen kaikissa sovelluksissa.

Julkinen liikenne on toinen hyvä keino vähentää liikenteestä aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Julkisen liikenteen kulkuneuvoissa matala energiatiheys ei aiheudu yhtä määrittäväksi ongelmaksi pääenergiavaraston kannalta, sillä säännölliset pysähdykset kuuluvat niiden reitteihin. Tämä on mahdollistanut esimerkiksi superkondensaattoreilla toimivat linja-autot<sup>1</sup>.

### 3.1.1 Julkinen liikenne

Julkinen liikenne perustuu jatkuviin pysähdyksiin, joiden aikana asiakkaat voivat tulla kyytiin ja lähteä kyydistä. Superkondensaattoreiden nopea latausaika mahdollistaa laitteiston lataamisen normaalin pysähdysten aikana linja-autoissa, joiden energiavarastointijärjestelmänä toimii superkondensaattori. Tämän lisäksi laitteistoja voidaan ladata jarrutuksen ja pysähtymisen aikana. Vaihtoehtoisesti lyhyillä reiteillä päätepysäkillä voitaisiin tehdä hieman pidempi pysähdys (n. 10 minuuttia), jossa lataaminen onnistuisi<sup>25</sup>. Superkondensaattorin lataaminen pysäkkien yhteydessä mahdollistaa jatkuvan kyyditsemisen ilman säännöllisiä pitkäkestoisia huoltotaukoja<sup>25</sup>. Sähköiset linja-autot olisivat lupaava keino vähentää sekä kasvihuonekaasupäästöjä että säästää luonnonvaroja. Muiden sähköajoneuvojen tavoin fossiilisiin ajoneuvoihin verrattuna, olisivat superkondensaattorilinja-autot huomattavasti hiljaisempia, pitkäikäisempiä, energiatehokkaampia ja yhteensopivampia monien uusiutuvien energialähteiden kanssa, jotka tuottavat enimmäkseen sähköenergiaa<sup>25</sup>. Onnistuneita järjestelmiä on testattu esimerkiksi Shanghaissa vuodesta 2006<sup>3</sup>, ja Torinossa vuonna 2021<sup>27</sup>.

Täysin superkondensaattoreihin nojautuvassa linja-autoliikenteessä on hyvien puolien lisäksi monia haasteita ja suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä. Ruuhkainen Shanghaiin keskusta poikkeaa monella tavalla Rovaniemen julkisen liikenteen tarpeista, missä pysäkkien välimatkat ovat huomattavasti pidempiä ja ajotyylillä on hyvin erilainen. Tämä tarkoittaa sitä, että reittisuunnittelu täytyy laskelmoida toimipaikkakohtaisesti ja ne voivat tarvita hyvin erilaisia

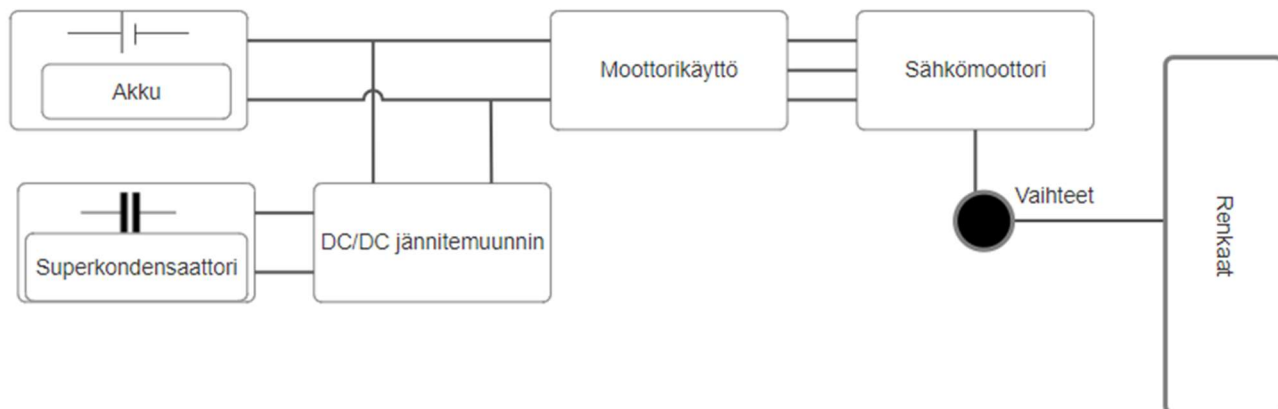
ratkaisuja<sup>25</sup>. Oikeanlaiseen energianvarastointilaitteiston valintaan vaikuttaa muun muassa linja-auton koko, sen sekä asiakkaiden paino, tarvittava moottorin teho, matkan pituus ja laitteistoon tarvittava kapasiteetti<sup>25</sup>. Tämän lisäksi kokonaisen julkisen liikenteen infrastruktuurin muuttaminen superkondensaattoreille sopivaksi on kallista.

Raideliikenne on myös laajasti sähköistettyä nykyään. Sähköisessä raideliikenteessä voidaan hyödyntää kiihdytyskontaktilinjoja, sillä kiihdytysten aikana kulkuväline vaatii eniten energiaa, jonka jälkeen kulkeminen raiteilla onnistuu tähän verrattuna hyvin pienellä energiamäärällä<sup>28</sup>. Superkondensaattoreita voitaisiin hyödyntää energiavarastoina junissa ja muussa raideliikenteessä, sillä ne voitaisiin ladata nopeasti näiden kontaktilinjojen aikana, ja näin junassa tai raidevaunussa olevan energiavaraston kokoa ja painoa voitaisiin vähentää<sup>28</sup>. Infrastruktuuriin rakennetut latauspisteet kontaktilinjoissa olisivat kustannustehokkaampi tapa superkondensaattoriraideliikenteeseen, sillä superkondensaattorivaraston pienentyminen olisi merkittävä säästö<sup>28</sup>. Tämän lisäksi ne olisivat sitä hyödyllisempiä, mitä enemmän kulkuneuvoja samalla raiteella liikkuu<sup>28</sup>. Toisaalta vähemmän käytetyillä reiteillä kontaktilinjojen rakentaminen voi tulla kalliimmaksi, minkä lisäksi niiden visuaalista haittaa esimerkiksi vanhoissa kaupungeissa on punnittu<sup>28</sup>.

### 3.1.2 Henkilöautot

Vaikka superkondensaattorit eivät voi toimia henkilöautojen pääenergiavarastona, voidaan niiden avulla tehdä ajoneuvoista energiatehokkaampia. Hybridienergianvarastointilaitteistot (HESS, engl. Hybrid energy storage system) tarkoittavat järjestelmiä, joissa esiintyy sekä akku, että superkondensaattori<sup>26</sup>. Tällaisia systeemejä voidaan sijoittaa sähköautoihin perinteisen akun tilalle tai hybridautoihin polttomoottorin kanssa. Kuvassa 2 on esitetty mahdollinen sähköpiirimalli hybridisähköautosta, jossa on rinnakkain akku ja superkondensaattori. Käytössä tällä hetkellä on 12 V tai 48 V EDL superkondensaattorisysteemejä<sup>25</sup>. Niiden etuina on jännitetaso tasaaminen, akun käyttöä pidentäminen ja turvallisuuden lisääminen<sup>25</sup>. EDLC:en ongelmia sovelluksissa on ollut kuitenkin matala energiatiheys, korkea itsepurkautumisaste ja korkea hinta<sup>25</sup>, jotka hidastavat laajempaa kaupallistumista ajoneuvoissa. Tämän lisäksi superkondensaattorisysteemit vievät tilaa ja lisäävät ajoneuvon painoa, jotka kummatkin tuovat haasteita<sup>25</sup>.





Kuva 2: Akku-superkondensaattorihybridiajoneuvon moottorin sähköpiiri<sup>29</sup>

Superkondensaattorin sisältämä energianvarastointilaitteisto mahdollistaisi ajoneuvoissa takaisin kytkettävän jarrutuksen, nopean kiihdyttämisen sekä tehokkaamman käynnistyksen<sup>25</sup>, jotka tekisivät ajoneuvoista energiatehokkaampia ja kestävämpiä. Superkondensaattorien potentiaali on herättänyt huomiota, ja jo vuonna 2013 kaikki merkittävimmät sähkö- ja hybridiautojen tuottajat olivat valmistaneet luonnoksia, joissa käytettäisiin superkondensaattoreita<sup>26</sup>.

Takaisin kytkettävällä jarrutuksella tarkoitetaan kykyä säilöä normaalisti jarrutuksessa menetettävä energia. Jarrutuksen aikana polttoaineilla käyvissä ajoneuvoissa jarrutuksesta syntyvä kineettinen energia muuttuu lämpöenergiaksi, joka vapautuu ilmaan, eikä sitä voida hyödyntää. Perinteiset akut ovat myös liian hitaita säilömään energiaa kyseisissä tilanteissa. Menetetty energia voitaisiin kuitenkin superkondensaattoreiden avulla ottaa talteen hyvin tehokkaasti. Jarrutuksen aikana kineettinen energia muunnetaan sähköisen moottorin avulla sähköenergiaksi<sup>25</sup>, joka saataisiin superkondensaattoreiden nopean latautumisaajan ansiosta varastoitua. Tätä mekanismia kutsutaan takaisinkytkettäväksi jarrutukseksi. Yritys Mazda Motor julkaisi EDLC-pohjaisen takaisinkytkettävän jarrutussysteemin henkilöautoihin vuonna 2011, jonka nimeksi tuli i-ELOOP<sup>25</sup>. Nyt systeemiä käytetään useammassa Mazdan valmistamassa automallissa.

Talteenotettu energia voidaan nopeasti hyödyntää tämän jälkeen apuna tulevaan kiihdytykseen tai mäen kohdalla lisäenergiana nousussa, jolloin polttomoottorihybridiajoneuvossa ei tarvitse käyttää yhtä paljoa polttoainetta. Jos ajoneuvossa on lisäksi mukana akku, voidaan energia myös ohjata superkondensaattorin ja tasavirta-

tasavirtamuuntimen (DC-DC-muunnin, engl. direct current) kautta lataamaan pääakkuja. Pysähdyksen aikana kaikki auton apuvälineet, kuten valot ja radio voitaisiin kytkeä superkondensaattorin piiriin, jolloin moottori voisi olla sammuksissa. Pelkät apuvälineet vievät vähemmän energiaa, jolloin DC-DC-muuntimen avulla voitaisiin 25 V anto muuttaa 12 V annoksi. Superkondensaattorijärjestelmän avulla säästetyn polttoaineen arvioidaan olevan noin 10 % normaalissa pysähtelevässä ajossa.<sup>25</sup>

## 3.2 Uusiutuvan energian voimat

Uusiutuvalla energialla on koko ajan kasvava merkitys yhteiskunnan energianlähteenä. Uusiutuvan energian voimat voivat kuitenkin antaa hyvin epätasaista ja jopa laadultaan vaihtelevaa virtaa<sup>26</sup>, sillä saatavan energian määrä riippuu sääolosuhteista. Tämä johtaa perinteisten akkujen nopeaan kulumiseen ja ongelmiin verkkovirtakytköksissä. Vaihtelevan saannon lisäksi uusiutuvan energian talteenottomenetelmät ovat yhä puutteellisia. Superkondensaattoreita ei voida niiden heikon energiantiheyden takia hyödyntää suoraan pitkäaikaisvarastona, mutta niillä on suuri potentiaali nostaa uusiutuvan sähköenergian talteenottoa.

Suurien energiavoimaloiden lisäksi pienemmät virtapiirit, joihin on liitettyä jokin uusiutuvan energianlähde, kuten aurinkokenno ovat yleistyneet. Tällaisia voi olla esimerkiksi auringonvalolla toimiva pihavalon tai rakennuksen kyljessä olevat aurinkokennot, jotka ovat liitettyinä mikroverkkoihin. Mikroverkoilla tarkoitetaan itsenäisiä pienempiä sähköverkoja, johon esimerkiksi yksittäisiä aurinkopaneeleja voidaan liittää.

### 3.2.1 Tuuli- ja vuorovesivoimat

Tuuli- ja vuorovesivoiman keräyksessä energiaa syntyy, kun virtaus osuu myllyjen siipiin, jotka alkavat pyörittämään turbiineja, jolloin liike-energia muuntuu sähköenergiaksi<sup>23</sup>. Yleisin tapa sähköenergian varastointiin ovat akut, mutta tässä on ollut haasteita. Energiämäärä voi vaihdella huomattavasti sääolosuhteiden mukaan, jonka takia epäsäännölliset tehon syötöt heikentävät nykyisten akkujen kapasitanssia ja lyhentävät niiden käyttöikä<sup>23</sup>. Periteiset akut eivät kykene latautumaan tarpeeksi nopeasti, jotta kaikki mahdollinen energia saataisiin hyödynnettyä. Ylilataamista on pyritty korjaamaan eri tavoin, ja hyvin lupaava vaihtoehto tällä hetkellä on superkondensaattorit.

Lupaavia tuloksia on saatu HESS:lla, sillä niitä voidaan hyödyntää myös alueilla, missä on vaikeampi siirtää energiaa suoraan sähköverkkoon<sup>23</sup>. Tällaisissa laitteistoissa superkondensaattorit pystyvät lieventämään suuria tehon vaihteluita, toimien vaimentimena, kun ne latautuvat nopeasti tehopiikkien aikana<sup>23</sup>. Samaan aikaan akku kykenee varastoimaan ennalta määritetyllä jännitteellä tasaisesti, eikä ylilatautumista tapahdu yhtä herkästi<sup>23</sup>. Tehovaihtelut voivat olla suuria, ja vaativat usein useamman superkondensaattorin tasaamaan jännitearvoja<sup>23</sup>. Systemin etuna on kohonnut energiantalteenotto<sup>23</sup>. Akut eivät myöskään kulu yhtä nopeasti, mikä pidentää niiden käyttöikää ja johtaa taloudellisiin sekä ekologisiin säästöihin. Tästä huolimatta erityisesti pienemmissä sähköverkoissa ylilatautuminen voi silti tapahtua, jolloin jännitettä joudutaan rajoittamaan lisävirtapiireillä<sup>23</sup>. Ylilatautumisen lisäksi ongelmana voi olla tämän vastakohta eli liian matala tehon anto. Tämä johtaa luotettavuus-, vakaus- ja tehonlaatuongelmiin, jos voimat ovat suoraan liitettynä ensisijaiseen sähköverkkoon<sup>26</sup>. Tätä on pyritty korjaamaan mikroverkkokytöksillä<sup>26</sup>.

HESS:in suunnittelussa täytyy ottaa huomioon tarvittava energianvarastointikyky sekä akulle, että superkondensaattorille, jotta laitteisto toimisi mahdollisimman tehokkaasti<sup>23</sup>. Tämän lisäksi täytyy suunnitella niiden liitännät, tehotasot sekä kokonaissyötöt ja -ulosannot<sup>23</sup>.

### 3.2.2 Aurinkovoimalat ja aurinkokennojen virtapiirit

Aurinkokennot ovat energiankeruulaitteistoja, jotka pystyvät muuntamaan auringonvaloenergiaa sähköenergiaksi<sup>23</sup>. Kuten tuulivoimaloissa myös aurinkovoimaloiden tuottama energia on riippuvainen sääolosuhteista, ja näin niihin pätee hyvin samankaltaiset ratkaisut energiankeruussa. Erityisesti aurinkovoimaloissa korostuu laitteistojen hyvä lämpötilakestävyys, sillä sijainnit voivat olla todella poikkeavia, ja piirit voivat kuumeta. Ylilatautumista on tutkittu paljon aurinkopaneelien yhteydessä, ja uusia hybridi aurinkokennoja yritetään myös kehittää<sup>23</sup>. Näiden haasteena on kuitenkin niiden manuaalikäyttövaatimus, jota on yritetty automatisoida<sup>23</sup>. Sharma ja kumppanit kehittivät eräänlaisen automatisoidun superkondensaattori-aurinkopaneeli-hybridijärjestelmän<sup>23</sup>. Järjestelmä kykeni siirtämään latauksen horrostilaan, jos tuotettu energia oli riittämätöntä<sup>23</sup>. Tämän lisäksi se pystyi aktivoimaan latauksen, kun energiaa oli varastoitu tarpeeksi<sup>23</sup>.

Aurinkokennoja voidaan nykyään yhdistää myös pienempiin virtapiireihin esimerkiksi yksittäisten talojen energiantuotannon tueksi. Erilaisilla simulaatiokokeilla on tutkittu superkondensaattoreiden mahdollisuuksia avustaa rakennusten energiatarpeiden kattamisessa. Tulokset ovat osoittaneet johdonmukaisesti, että HESS pidentää akkujen käyttöikää ja alentaa

talouksien energiankulutusta<sup>23</sup>. Turvallisuutta, kuten mahdollinen paloriski on myös tutkittu, kun huomattiin ylikuumentamisen olevan mahdollinen ongelma. Tätä varten kehitettiin lämpövirta-muunnin, joka pystyy muuntamaan lämpöä virraksi ja varoittamaan mahdollisen ylikuumentamisen riskistä<sup>23</sup>. Wong ja kumppanit onnistuivat eliminoimaan ylikuumentamisriskin myös tehosäätimen avulla, jonka avulla he vähensivät virran vaihteluita, joka samalla johti myös vakaampaan energiajärjestelmää<sup>23</sup>.

## 4 Johtopäätökset

Uusiutuvan energian tuotanto- tai talteenottomenetelmät eivät ole valitettavasti vielä samalla tasolla koko ajan kasvavan energiatarpeen kanssa. Superkondensaattorit ovat kuitenkin mahdollistaneet monien sovelluksien energiatehokkaamman käytön ja näin varmasti löytäneet pysyvän paikan infrastruktuurista. Vaikka kehitys ei ole lähellekään valmis, on lupaavia tuloksia saatu jo monelta eri osa-alueelta.

Superkondensaattoreiden virrasta riippuvat reversiibelit toimintaperiaatteet mahdollistavat niiden pitkän käyttöiän ja kestäväen rakenteen. Nykysovelluksissa on eniten käytössä EDLC:t, mutta myös pseudokondensaattoreiden potentiaali huomioidaan niiden tarjoaman korkeamman energiatihedden ansiosta. Näiden lisäksi hybridisuperkondensaattoreilla näiden kahden superkondensaattorityypin ominaisuuksia saadaan yhdisteltyä.

Aktiivihiihi on tällä hetkellä sovelluksissa käytetyin elektrodimateriaali muun muassa sen edullisen tuotannon ansiosta. Vihreiden materiaalien tutkimuksessa aktiivihiihtä on alettu valmistaa biomassasta, joka on hyvin potentiaalinen helpompi ja erityisesti ekologisempi tapa valmistaa hiiltä. Pseudokondensaattoreissa metallioksidit ovat laajasti käytettyjä, joka johtuu niiden hyvistä redox-ominaisuuksista, mutta samaan aikaan materiaalit ovat ympäristöystävällisiä ja yksinkertaisia kierrättää. Myös uusia materiaaleja, kuten metallioksidi-biohiili-komposiittia, tutkitaan jatkuvasti, toiveena parantaa superkondensaattoreiden ominaisuuksia sekä kestävyyttä entisestään. Tähän kuuluu myös uusien elektrolyyttien tutkiminen.

Sovelluksissa superkondensaattoreiden suurimmat edut ovat niiden suuri tehoteho, nopea lataus- ja purkauskyky sekä kestävyys. Niiden tukema liikenne voisi mahdollistaa vihreämpiä energiaratkaisuja julkiseen liikenteeseen ja tuoda katkeamattoman linja-autoliikenteen pysäkeille rakennettujen latauspisteiden avulla. Henkilöautoissa superkondensaattorijärjestelmä mahdollistaisi energiatehokkaamman sekä ekologisemman ajamisen muun muassa takaisinkytkettävän jarrutuksen ja lisäkiihdytysavun kautta.

Sähköenergiavarastona superkondensaattoreiden etu on myös niiden yhteensopivuus uusiutuvien energianlähteiden, kuten aurinkopaneelien ja tuulimyllyjen kanssa, jotka tuottavat sähköenergiaa. Samaa aikaan niitä voidaan hyödyntää näiden talteenottojärjestelmissä, jotta uusiutuvan energian talteenotto paranisi. Niiden käyttö suojaisi järjestelmissä käytettäviä akkuja, mikä pidentää niiden elinikää, johtaen ekologiin ja taloudellisiin säästöihin.

Superkondensaattori on yksi hyvä vaihtoehto pienentämään nykyisen energiasektorin energiankulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Tehokkaampi energiantuotanto ja energiatehokkaat sovellukset ovat hyvin oleellinen osa kestäväen maailman rakentamisessa. Monet nyky-yhteiskunnan ongelmista ovat jo todella spesifejä ja näin olisikin tärkeää, että sovelluksia löytyy ja optimoidaan laajemmin kaupallistettavaksi. Näin pystytään hyödyntämään optimaalisinta ratkaisua jokaiseen sovellukseen. Superkondensaattoreiden sovelluksissa tämä voidaan nähdä esimerkiksi HESS-piireissä, joissa akun ja superkondensaattorin yhdistämisen tuloksena on energiatehokkaampi sovellus.

#### 4.1 Tulevaisuuden näkymät

Superkondensaattoriteknologialla on suuri potentiaali parantaa energiasektorin tehokkuutta ja tehdä infrastruktuuristamme kestävämpi. Tätä varten on kuitenkin tehtävä vielä työtä. Erityisen tärkeää olisi, että materiaaleista ja valmistusprosesseista saadaan kestäviä. Tutkimus, joka tekisi eri valmistusmenetelmistä kustannustehokkaita, olisi tärkeää, jotta yhä useampia materiaalivaihtoehtoja saataisiin kaupallistettua. Myös jatkuva materiaalitutkimus on tärkeää ominaisuuksien parantamiseksi. Uudet elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit voivat antaa uusia ratkaisuja sovelluksiin ja tuoda esiin yhä parempia ominaisuuksia.

Toinen tärkeä tutkimuskohde on superkondensaattoreiden energiatheyden parantaminen<sup>29</sup>. Monissa sovelluksissa matala energiatheys vaatii sovittelua, esimerkiksi lisäämällä useampia superkondensaattoreita tai käyttämällä HESS:ja . Tämä ei kuitenkaan ole aina ideaalia, sillä nämä ratkaisut vaikuttavat laitteistojen sovellettavuuteen lisäämällä laitteiston painoa ja hintaa merkittävästi. Uusien materiaalien ja elektrolyyttien tutkiminen, sekä tutkimus, joka keskittyisi erilaisiin virtapiiriratkaisuihin kulkevat tässä käsi kädessä.

Sovelluksien kannalta myös markkinastandardien laatiminen ja täytyminen on hyvin tärkeää<sup>29</sup>. Pitkä käyttöikä ja kestävä rakenne antavat hyvän pohjan superkondensaattoreiden sovelluksiin. Tämän lisäksi monia ominaisuuksia kuten energia- ja tehotiehyttä sekä kapasitanssia arvioidaan ja tutkitaan paljon. Sekä näitä eri ominaisuuksia, että tuotantoa varten olisi hyvä myös määritellä superkondensaattoriteollisuudelle standardit. Standardit ja standardisoidut kokeet auttavat kestäväen ja turvallisen kehityksen toteutumisessa niin, että teknologia on luotettavaa. Joitain superkondensaattoreita koskevia standardeja on jo kehitelty. Yksi näistä on Euroopan unionin direktiivi RoHS (engl. Restriction of hazardous substances in electrical and electronic equipment)<sup>30</sup>. Tämä rajoittaa haitallisten aineiden kuten lyijyn, elohopean ja kadmiumin käyttöä yleisesti elektroniikka teknologiassa<sup>30</sup>.

Infrastruktuurin päivittämiseen panostaminen on myös hyvin tärkeää. Viimeisimmät vuosikymmenet yhteiskunta on pyörinyt fossiilisilla polttoaineilla, joita varten suurin osa infrastruktuurista on nyt rakennettu. Fossiilisilla polttoaineilla ei ole pitkää, kestävää tulevaisuutta ja vaikka nykyinfrastruktuuria voidaan hyödyntää esimerkiksi uusiutuvien polttoaineiden käytössä, on tehtävä enemmän tilaa myös muille vaihtoehdoille. Tulevaisuudessa taloudelliset sijoitukset kestäviin valintoihin tulevat olemaan kriittisiä.

## Lähteet

- (1) Olabi, A. G.; Abbas, Q.; Al Makky, A.; Abdelkareem, M. A. Supercapacitors as next Generation Energy Storage Devices: Properties and Applications. *Energy* **2022**, *248*.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123617>.
- (2) *Suomen Kasvihuonekaasupäästöt 1990-2020*; Helsinki, **2021**.
- (3) Horn, M.; MacLeod, J.; Liu, M.; Webb, J.; Motta, N. Supercapacitors: A New Source of Power for Electric Cars? *Econ Anal Policy* **2019**, *61*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2018.08.003>.
- (4) Zhai, Z.; Zhang, L.; Du, T.; Ren, B.; Xu, Y.; Wang, S.; Miao, J.; Liu, Z. A Review of Carbon Materials for Supercapacitors. *Materials and Design*. Elsevier Ltd September 1, **2022**.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111017>.
- (5) Zhou, L.; Li, C.; Liu, X.; Zhu, Y.; Wu, Y.; van Ree, T. Metal Oxides in Supercapacitors. In *Metal Oxides in Energy Technologies*; Elsevier, **2018**; pp 169. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811167-3.00007-9>.
- (6) Khedulkar, A. P.; Pandit, B.; Dang, V. D.; Doong, R. an. Agricultural Waste to Real Worth Biochar as a Sustainable Material for Supercapacitor. *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V. April 15, **2023**. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161441>.
- (7) Shaheen, I.; Hussain, I.; Zahra, T.; Javed, M. S.; Shah, S. S. A.; Khan, K.; Hanif, M. B.; Assiri, M. A.; Said, Z.; Arifeen, W. U.; Akkinepally, B.; Zhang, K. Recent Advancements in Metal Oxides for Energy Storage Materials: Design, Classification, and Electrodes Configuration of Supercapacitor. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd November 30, **2023**.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108719>.
- (8) Khedulkar, A. P.; Dang, V. D.; Thamilselvan, A.; Doong, R.; Pandit, B. Sustainable High-Energy Supercapacitors: Metal Oxide-Agricultural Waste Biochar Composites Paving the Way for a Greener Future. *J Energy Storage* **2024**, *77*, 109723. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109723>.
- (9) Bhat, T. S.; Patil, P. S.; Rakhi, R. B. Recent Trends in Electrolytes for Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd June 1, **2022**. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104222>.
- (10) Bhojate, S.; Ranaweera, C. K.; Zhang, C.; Morey, T.; Hyatt, M.; Kahol, P. K.; Ghimire, M.; Mishra, S. R.; Gupta, R. K. Eco-Friendly and High Performance Supercapacitors for Elevated Temperature Applications Using Recycled Tea Leaves. *Global Challenges* **2017**, *1* (8).  
<https://doi.org/10.1002/gch2.201700063>.
- (11) Zequine, C.; Ranaweera, C. K.; Wang, Z.; Singh, S.; Tripathi, P.; Srivastava, O. N.; Gupta, B. K.; Ramasamy, K.; Kahol, P. K.; Dvornic, P. R.; Gupta, R. K. High per Formance and Flexible Supercapacitors Based on Carbonized Bamboo Fibers for Wide Temperature Applications. *Sci Rep* **2016**, *6*. <https://doi.org/10.1038/srep31704>.
- (12) Rufford, T. E.; Hulicova-Jurcakova, D.; Khosla, K.; Zhu, Z.; Lu, G. Q. Microstructure and Electrochemical Double-Layer Capacitance of Carbon Electrodes Prepared by Zinc Chloride



- Activation of Sugar Cane Bagasse. *J Power Sources* **2010**, *195* (3), 912.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.08.048>.
- (13) Zhao, G.; Chen, C.; Yu, D.; Sun, L.; Yang, C.; Zhang, H.; Sun, Y.; Besenbacher, F.; Yu, M. One-Step Production of O-N-S Co-Doped Three-Dimensional Hierarchical Porous Carbons for High-Performance Supercapacitors. *Nano Energy* **2018**, *47*, 547.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.016>.
- (14) Alcaraz-Espinoza, J. J.; De Melo, C. P.; De Oliveira, H. P. Fabrication of Highly Flexible Hierarchical Polypyrrole/Carbon Nanotube on Eggshell Membranes for Supercapacitors. *ACS Omega* **2017**, *2* (6), 2866–2877. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00329>.
- (15) Gao, F.; Qu, J.; Zhao, Z.; Wang, Z.; Qiu, J. Nitrogen-Doped Activated Carbon Derived from Prawn Shells for High-Performance Supercapacitors. *Electrochim Acta* **2016**, *190*, 1134.  
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.005>.
- (16) Zhai, Z.; Ren, B.; Xu, Y.; Wang, S.; Zhang, L.; Liu, Z. Nitrogen Self-Doped Carbon Aerogels from Chitin for Supercapacitors. *J Power Sources* **2021**, *481*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228976>.
- (17) Zhai, Z.; Ren, B.; Xu, Y.; Wang, S.; Zhang, L.; Liu, Z. Nitrogen Self-Doped Carbon Aerogels from Chitin for Supercapacitors. *J Power Sources* **2021**, *481*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228976>.
- (18) Goel, S.; Munjal, M.; Sharma, R. K.; Singh, G. Advanced Applications of Green Materials in Supercapacitors. In *Applications of Advanced Green Materials*; Elsevier, **2020**; pp 339.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820484-9.00014-3>.
- (19) Baig, M. M.; Gul, I. H.; Baig, S. M.; Shahzad, F. The Complementary Advanced Characterization and Electrochemical Techniques for Electrode Materials for Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd December 1, **2021**. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103370>.
- (20) Chodankar, N. R.; Patil, S. J.; Hwang, S. K.; Shinde, P. A.; Karekar, S. V.; Raju, G. S. R.; Ranjith, K. S.; Olabi, A. G.; Dubal, D. P.; Huh, Y. S.; Han, Y. K. Refurbished Carbon Materials from Waste Supercapacitors as Industrial-Grade Electrodes: Empowering Electronic Waste. *Energy Storage Mater* **2022**, *49*, 564. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.04.039>.
- (21) Jiang, G.; Pickering, S. J. Recycling Supercapacitors Based on Shredding and Mild Thermal Treatment. *Waste Management* **2016**, *48*, 465. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.027>.
- (22) Végvári, Z. Supercapacitors and Their Military Applicability. *Honvédségi Szemle* **2020**, *147* (1–2).  
<https://doi.org/10.35926/hdr.2019.1-2.3>.
- (23) Zhang, J.; Gu, M.; Chen, X. Supercapacitors for Renewable Energy Applications: A Review. *Micro and Nano Engineering* **2023**, *21*. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2023.100229>.
- (24) *Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and the Council*; European Parliament: EU, **2019**.

- (25) Guo, L.; Hu, P.; Wei, H. Development of Supercapacitor Hybrid Electric Vehicle. *J Energy Storage* **2023**, *65*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107269>.
- (26) Şahin, M. E.; Blaabjerg, F.; Sangwongwanich, A. A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments. *Energies*. MDPI February 1, **2022**. <https://doi.org/10.3390/en15030674>.
- (27) A Pilot in Turin for the SmartBUS, the e-Bus with Supercaps in Place of Batteries. *Sustainable Bus Magazine*. **2021**.
- (28) Mwambeleko, J. J.; Kulworawanichpong, T. Supercapacitor and Accelerating Contact Lines Hybrid Tram System. *J Energy Storage* **2021**, *44*. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103277>.
- (29) Yadlapalli, R. T.; Alla, R. K. R.; Kandipati, R.; Kotapati, A. Super Capacitors for Energy Storage: Progress, Applications and Challenges. *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd May 1, **2022**. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104194>.
- (30) DIRECTIVE 2011/65/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 8 June 2011 on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. *Official Journal of the European Union* **2011**, *54*, 88.