

Maija Nousiainen

LÄMPÖENERGIAN VARASTOINTI HIEKKAAN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Joulukuu 2023

TIIVISTELMÄ

Maija Nousiainen: Lämpöenergian varastointi hiekkaan
Thermal energy storage in sand
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Joulukuu 2023

Yhteiskuntamme yksi suurimmista haasteista on nykyään energian tyydyttävä tarjonta, toimitettavuus ja hallinta. Pyrkimys kohti vähähiilistä ja tehokasta energiasektoria on johtanut uusiutuvan aurinkosähkön ja tuulivoimalla tuotetun sähkön käytön kasvuun ympäri maailmaa. Vankkoja energian varastointiratkaisuja tarvitaan verkon joustavuuden lisäämiseksi. Näistä varastointiteknologioista hiekka-akkujen hyödyntäminen lämpöenergian varastoinnissa kehitty kovasti. Työn tavoitteena on tutkia hiekan termofysikaalisia, kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia lämpöenergian absorboijana. Lisäksi perehdytään eri hiekkalaatujen alkuperän ja alku-koostumuksen vaikutukseen lämmönvarastoinnissa.

Työssä käydään läpi hiekan alkuainekoostumuksen selvittämiseksi hyödynnettyjä menetelmiä ja hiekka-akkujen mahdollisia sovelluskohteita. Työn tarkoituksena on myös tehdä vertailua hiekan ja vaihtoehtoisten materiaalien välillä. Hiekan ominaisuuksista uudelleenkäytettävyys, helppo saatavuus, suuri massatiheys ja alhaiset taloudelliset valmistuskustannukset tekevät hiekasta ihanteelliseen alueella, joilla on runsaasti aurinkoenergiaa. Hiekka materiaalina voi lisätä aurinkoylijäämän varastoinnin ja muuntamisen tehokkuutta.

Lämpöenergian tehokas varastointi hiekkaan edellyttää riittäviä termofysikaalisia, kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia. Termofysikaalisia ominaisuuksia ovat korkea energiatiheys, lämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja pitkän aikavälin lämmönkierron vakaus. Kemiallisista ominaisuuksista tärkeimpiä ovat kemiallinen stabiilius, myrkyttömyys, räjähtämättömyys, vähäinen reaktiivisuus välittäjäaineen ja säiliömateriaalien kanssa. Mekaanisista ominaisuuksista alhainen lämpölaajenemiskerroin, korkea puristuslujuus ja korkea rakenteellinen jäykkyys ovat keskeisimpiä.

Työssä esitellään hiekka-akkujen sovelluskohteista passiivinen kiintokerrossysteemi, termokliininen lämpövarasto ja leijupetisysteemi. Passiivinen kiintokerrossysteemi perustuu hiekan ja lämmönsiirtonesteen suoraan pintakosketuksella tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Termokliinissä systeemissä hiekka on täyteaineena petirakenteen sisällä, jossa lämpö-öljy toimii lämmönsiirtonesteenä. Leijupetisysteemissä hiekkapartikkelit on seostettu nesteeseen, mikä mahdollistaa lämmönsiirtonopeuden tehostamisen.

Työssä on myös käsitelty hiekka-akkujen ympäristönäkökulmia ja tulevaisuuden kehityspotentiaaleja. Ympäristönäkökohdista hiekan alhainen valmistusenergian tarve ja pieni hiilidioksidijalanjälki tukevat kestäväää kehitystä. Tulevaisuudessa seuraavan sukupolven teknologioille korkeammat käyttölämpötilatasot 800–1000 °C:seen, suuremmat varastointikapasiteetit, kehittyvät kemiallinen ja mekaaninen vakaus, optimoitu ympäristöjalanjälki ja alhaiset kustannukset ovat pakollisia. Tärkeimpiä parannuksia ovat laajempi käyttölämpötila-alue, varastointikapasiteetti ja kokonaisvarastointikustannukset. Näiden ominaisuuksien kokonaisvaltainen parantaminen voisi johtaa aurinkolämpösähkön tuotannon kilpailukyvyyn kasvuun.

Avainsanat: lämpöenergiavarasto, hiekka-akku, lämpöenergia, uusiutuva energia, lämmönsiirtovälittäjäaine, keskitetty aurinkovoimatuotanto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HIEKKALAATUJEN OMINAISUUDET JA MENETELMÄT	3
2.1 Hiekkalaatujen alkuainekoostumus ja ominaisuudet.....	3
2.2 Hiekkalaatujen ominaisuuksien selvittämiseen käytetyt menetelmät	5
3. LÄMPÖENERGIAJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU	7
3.1 Lämpöenergian varastointimuodot	7
3.2 Varastointimateriaalin vaikutus lämmönsiirtoon.....	8
3.3 Lämmönvarastointi- ja vapautusmenetelmäjärjestelmät	12
4. HIEKKA-AKKUJEN SOVELLUSKOHTEET	15
4.1 Passiivinen kiintokerrossysteemi.....	15
4.2 Termokliininen lämpövarasto	17
4.3 Leijupetisysteemi	18
5. VAIHTOEHTOISTEN MATERIAALIEN VERTAILU	20
6. HIEKKALÄMPÖVARASTOJEN KEHITYSPOTENTIAALI.....	24
6.1 Hiekkalämpövarastojen ympäristövaikutukset	24
6.2 Hiekkalämpövarastojen tulevaisuuden näkymät.....	25
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	27
LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

TES	Thermal Energy Storage, Lämpöenergiavarasto
CSP	Concentrating Solar Power Plant, Keskitetty aurinkovoimatuotanto
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, Fourier-infrapuna-absorptiospektroskopia
HTF	Heat Transfer Fluid, Lämmönsiirtovälittäjäaine
TESM	Thermal Energy Storage Material, Lämpöenergian varastointimateriaali
TG	Thermal Gravimetry, Lämpögravimetria
HTTESS	Heat Temperature Thermal Energy Storage System, Lämpöenergian varastointisysteemi
MBHX	Moving Bed Heat Exchanger, Liikkuva peti lämmönvaihdin
XRD	X-ray Diffraction, Röntgen diffraktio
CAES	Compressed Air Energy Storage, Paineilmaenergiavarasto

1. JOHDANTO

Aurinkoenergian muuntaminen lämpöenergiaksi on helpoin ja laajin käytössä oleva menetelmä. Aurinkoenergian ajoittaisen luonteen vuoksi aurinkokeräimiin on liitettävä energianvarastointiyksikkö, jotta energiaa voidaan varastoida käytettäväksi silloin, kun aurinkoenergiaa ei ole saatavilla. Suora yhteys kiinteän varastointimateriaalin ja lämmönsiirtoaineen välillä on oltava hyvä lämmönsiirrosta aiheutuvien kustannusten minimoimiseksi. Kivien ja hiekan hyödyntäminen lämpövarastoinnissa on hyvä vaihtoehto, koska ne ovat edullisia, myrkyttömiä ja syttymättömiä.[1]

Hiekkalämpövarastojen ideana on siis varastoida esimerkiksi aurinkopaneeleilla tai tuulivoimalla tuotetusta sähköenergiasta osa lämpönä hiekkaan [2]. Hiekkaa kuumennetaan esimerkiksi aurinkokeräinten avulla, jolloin lämpöenergia varastoidaan hiekan lämpötilan nousuna. Tämä lämpöenergia voidaan myöhemmin käyttää esimerkiksi sähköntuotantoon höyryn ja turbiinien avulla. Hiekasta tehtävien mittausten perusteella arvioidaan sen suorituskykyä lämpöenergian absorboijana [3]. Hiekkalämpövaraston sisältämää lämpöä voidaan hyödyntää kaukolämpöverkossa. Hiekan tilalla voidaan hyödyntää myös muita kivimäisiä materiaaleja kuten kaivos- ja metalliteollisuuden sivuvirtoja tai mahdollisesti jätemateriaaleja.[2] Materiaalien on kuitenkin täytettävä riittävät lämpötekniset ominaisuudet, joita on esimerkiksi lämmönjohtumiskyky, lämpökapasiteetti ja laaja lämpötila-alue [3]. Lisäksi täyttömateriaalin varastointikapasiteetin on oltava suuri (yli 2 MJ/m³K), jotta lämpövaraston tilavuutta voidaan pienentää, mikä alentaa materiaalikustannuksia ja säiliökustannuksia [4]. Lämmönsiirtoaineen ja täyteaineen välisen yhteyden parantamiseksi varastosäiliön pallomainen muoto olisi optimaalinen.

Hiekan hyödyntämisen etuina on, että se on helposti saatavilla, edullista, edullinen varastointikapasiteetti, turvallista käsitellä ja säilöä. Tehokkaalle energian varastoinnille on tarvetta, koska aurinko- ja tuulivoima tarvitsee varastoida siten, että energiavarastoja voidaan purkaa tarvittaessa. Säilömissä on oltava kustannustehokasta ja edullista varastoida. Lämmönhukkaan voidaan vaikuttaa suhteuttamalla kokonaistilavuus mahdollisimman suureksi suhteessa ulkopinta-alaan.[2] Tällä hetkellä hiekka-akkujen kehityspotentiaali on suuremman mittakaavan laitoksissa eikä yksittäisten pienkotien energiatarpeeseen vastaamisessa [5].

Tämän kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat:

1. Miksi lämpöä varastoidaan hiekkaan?
 - 1.1 Mitä eri ominaisuuksia eri hiekkalaaduilla on?
 - 1.2. Millä eri menetelmillä lämpöä voidaan varastoida hiekkaan?
 - 1.3. Millä eri menetelmillä lämpöä saadaan hiekasta?
 - 1.4. Mitä etuja ja haittoja lämmönvarastoinnista hiekkaan on?
2. Minkälaisia kehityspotentiaaleja ja tulevaisuuden näkymiä hiekkalämpövarastoissa on?
3. Minkälaisia ympäristövaikutuksia hiekan varastointiin liittyy?

Kandidaatintyön tutkimuksen tavoite on rajattu tarkastelemaan erityisesti lämpöenergian varastointia hiekkaan ja sen mahdollisuuksia. Tavoitteena on myös tehdä vertailua hiekan ja vaihtoehtoisten materiaalien välillä.

Tämän kandidaatintyön 2. luvussa käsitellään hiekkalaatujen ominaisuuksia ja menetelmiä. Tarkoituksena on käsitellä hiekan alkuainekoostumusta ja vaihtoehtoisia menetelmistä hiekan alkuainekoostumuksen selvittämiseksi. Luvussa 3. käsitellään lämpöenergian varastointi- ja vapautusjärjestelmien suunnittelua. Luvussa 4. esitellään hiekka-akkujen sovelluskohteista passiivinen kiintokerrossysteemi, termokliininen lämpövarasto ja leijupetisysteemi. Luvussa 5. kerrotaan vaihtoehtoisten materiaalien vertailusta hiekan korvaajana. Luvussa 6. tarkastellaan hiekkalämpövarastojen kehityspotentiaalia, kuten hiekkalämpövarastojen mahdollisia ympäristövaikutuksia ja hiekkalämpövarastojen tulevaisuuden näkymiä. Luvussa 7. esitetään kandidaatintyön johtopäätökset.

2. HIEKKALAATUJEN OMINAISUUDET JA MENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään eri hiekkalaatujen alkuainekoostumusta, ominaisuuksia ja hyödynnettyjä menetelmiä. Tarkoituksena on perehtyä hiekkalaatujen alkuainekoostumukseen ja siitä seuraaviin fysikaalisiin, mekaanisiin ja optisiin ominaisuuksiin. Lisäksi perehdytään menetelmiin ja tekniikoihin hiekan ominaisuuksien selvittämiseksi.

2.1 Hiekkalaatujen alkuainekoostumus ja ominaisuudet

Hiekan spektroskooppisissa tutkimuksissa on havaittu hiekan koostuvan pääasiassa seuraavista komponenteista: pii (Si), kalsium (Ca), happi (O), kalium (K), rauta (Fe) ja mangaani (Mn). Hiekassa on myös pieninä pitoisuuksina alkuaineita: natrium (Na), rikki (S), kromi (Cr), alumiini (Al), barium (Ba), cesium (Ce) ja magnesium (Mg). Nämä alkuaineet muodostavat yhdisteitä, kuten kvartsia (SiO_2), kipsiä ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), rautaoksidia (Fe_2O_3) ja alumiinioksidia (Al_2O_3). Hiekasta on vaikea erottaa sen alkuaineita ja siitä muodostuneita yhdistettä, koska hiekka muodostaa monimutkaisen seoksen sen yhdisteistä. Tieto yhdisteiden olemassaolosta ja niiden suhteesta toisiinsa helpottaisi hiekkayhdisteiden erottamista. Siksi on tarpeellista tutkia hiekkakomponenttien korrelaatiota sekä sen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Lisäksi olisi hyvä tietää fysikaalisten vaikutusten, kuten lämmön ja säteilyn vaikutus näihin yhdisteisiin, niiden vuorovaikutuksiin sekä sähkönjohtavuuteen ja taitekertoimeen. [6]

Hiekasta mitataan fysikaaliset, mekaaniset ja optiset ominaisuudet, jotta sen suorituskykyä voidaan arvioida lämpöenergian absorboijana. Nämä ominaisuudet riippuvat siitä, mistä hiekka on alun perin peräisin esimerkiksi dyynihiekalla, jokihiekalla ja kaivoshiekkalla on erilaiset alkuainekoostumukset. Myös hiekan lämmönjohtavuus ja tilavuuslämpökapasiteetti riippuvat hiekan alkuperästä, koosta ja polttolämpötilasta [4]. Dyynihiekka koostuu pääasiassa kalsiumista ja piistä. Dyynihiekka sisältää myös alumiinia ja rautaa sekä pieniä määriä vetyä, hiiltä ja happea. Analyysit osoittavat, että hiekkänäytteet ovat termisesti stabiileja keskimäärin lämpötilavälillä 650 °C - 1000 °C . Dyynihiekan lämmityskierrossa tapahtuu massahäviöitä, kun kalsiumkarbonaatti muuttuu kalsiumoksidiksi. Tällä on negatiivinen vaikutus auringon absorboitumispotentiaaliin. Lämpötilan kasvaessa yli 1200 °C kalsiumkarbonaattipitoisuus on merkittävä syy kasaantumien muodostumiseen. Hiekkänäytteiden parempaan absorptiokykyyn vaikuttaa siis pieni kalsiumpitoisuus. Jokihiekalla on korkeampi vesipitoisuus kuin dyynihiekalla, jolla on vaikutusta

termisiin ominaisuuksiin. Kaivoshiekka koostuu suurilta osin kvartsista eli piidioksidista.[3]

Tietoa hiekan mekaanisista ominaisuuksista kuten hiukkaskokojakaumasta, tiheydestä ja huokoisuudesta tarvitaan järjestelmän osien suunnitteluun kuten varastointiin ja lämmönsiirtomallien kehittämiseen [3]. Eri mekaanisten ominaisuuksien osalta muita epävarmuustekijöitä on esimerkiksi sytytyshäviö ja aksiaalinen vetolujuus [4]. Optisista ominaisuuksista auringon absorptiokyky ja korkean lämpötilan emissiivisyys ovat keskeisiä lämpömallien kehittämisessä [3].

Hiekan mineraalinen koostumus riippuu merkittävästi hiekan alkuperästä. Länsi-Afrikassa on hyvät mahdollisuudet raaka-aineresurssien tuottamiseen esimerkiksi Burkinassa ja Nigerissä louhitaan hiekkaa, savea ja hiilen pohjatuhkaa keramiikan muotoiluun ja järkevää lämmönvarastointia varten. Esimerkiksi Länsi-Afrikan alueella hiekan mineraalinen koostumus on jopa 80 % kvartsia (SiO_2), 9 % alumiinioksidia (Al_2O_3) ja loput muita oksideja. [4] Hiekkänäytteiden huokoisuus vaihtelee hiekan alkuperän mukaan. Haihtuvien komponenttien osuus Burkinan dyynihiekasta on noin 9,71 % ja Burkinan kaivoshiekasta haihtuvien komponenttien osuus on noin 6,21 %. Nigeristä peräisin olevan dyynihiekan haihtuvien komponenttien osuus 1,12 % ja Nigeristä peräisin olevan luonnonhiekan haihtuvien komponenttien osuus on noin 7,82 %. [4]

Lämpögravimetrinen (TG) analyysin avulla on tukittu eri kivilajien ominaisuuksia. Tässä analyysissä graniitti ja marmori menettivät painostaan 3,3 % - 2,9 % lämpötilassa 350°C:tta. Marmorin kemiallisen koostumuksen takia hiilidioksidia karkasi ilmakehään kuumennuksen aikana. Graniitti puolestaan koostuu hydroksyyliidoksista sisältävistä mineraaleista, jotka rikkoutuvat korkeassa lämpötilassa, mikä johtaa massanmenetykseen. Muut kivilajit kvartsiitti, basaltti olivat lämpöstabieleja 400 °C:een asti ilman massahäviöitä.[7] Taulukossa 1 on esitetty eri kivilajien termofysikaalisia ominaisuuksia.

Taulukko 1. Kivilajien ominaisuuksien vertailu, perustuu lähteeseen [7]

Kivilajit	huokoisuus %	Tiheys kg/m ³	Vetolujuus Mpa	lämpökapasiteetti kJ/kgK 20°C:ssa	lämmönjohtuvuus W/mK	Lämmönvarastointi	
						kapasiteetti kJ/m ³ K	pääkomponentit
Graniitti	1,02 - 2,87	2530 - 2620	100 - 300	0,6 - 1,2	2,8	1440 - 2880	SiO ₂ (69%) Al ₂ O ₃ (14%)
Kvartsiitti	0,22 - 22,1	2210 - 2770	100 - 350	0,8 - 0,9	2	1750 - 2500	SiO ₂ (94%)
Marmori	0,40 - 0,65	2510 - 2860	150 - 300	0,7 - 1	7,7	3822	CaO(54%)
Basaltti	0,65 - 0,81	2610 - 2670	50 - 200	1,47	3,2	1680 - 2520	SiO ₂ (47%) Al ₂ O ₃ (17%) Fe ₂ O ₃ (10%) CaO(13%)

Hiekan kasaantuminen korkeissa lämpötiloissa on ongelma, joka vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Hiekkakasaumat estävät hiekan virtauksen aurinkovastaanottimen läpi. Hiekkakasaumat vaikuttavat hiekan varastointiin sillä kasaumia muodostuu korkeissa

lämpötiloissa ja näin mahdollisesti estävät varastosäiliön purkamisen. Kasaantumien muodostumiseen vaikuttaa hiekan epäpuhtauksien kalsiumin, alumiinin ja magnesiumin matala sulamispiste 500–700 °C:ta. Lämpökäsittely tutkimuksessa joihinkin hiekanäytteisiin muodostui kasaantumia, kun ne oli lämmitetty korkeaan lämpötilaan sähköuunissa. Kaikissa tapauksessa kasaantumien muodostumiseen voidaan vaikuttaa värähtelevällä liikkeellä. [8] Osassa näytteissä havaittiin hiekanäytteen värinmuutos vaaleampiin sävyihin ja massanmuutoksia lämpökäsittelyn jälkeen. Esimerkiksi joki- ja aavikko-hiekka muuttuivat punaiseksi lämpökäsittelyn jälkeen. Lisäksi joki- ja aavikkohiekan massahäviöt lämpökäsittelyn jälkeen olivat noin 5,11 % ja 2,11 %.[9]

2.2 Hiekkalaatujen ominaisuuksien selvittämiseen käytetyt menetelmät

Hiekan ominaisuuksien määrittämiseksi on useita menetelmiä. Hiekan ominaisuuksien määrittämiseksi on hyödynnetty lämpögravimetristä (TG), Fourier-muunnettua infrapuna-absorptiospektritutkimusta (FTIR) ja Röntgen diffraktio -tekniikkaa (XRD). Infrapuna-absorptiospekttri antaa tietoa materiaalissa esiintyvien kemiallisten sidosten luonteesta ja määrästä. [6] Lisäksi on hyödynnetty sähköuunia tutkimaan hiekan kasaantumien muodostumista. Hiekan lämpötehon määrittämiseksi lämpötehoa on mitattu kalorimetrillä uunin lämpökäsittelyn jälkeen.[8]

Lämpögravimetrisessä (TG) analyysissä raportoidaan tiedot näytteen ajallisena massanmuutoksena kokeen aikana. Analyysin tuloksia voidaan käyttää kaikkien näytteiden kalsiumkarbonaattipitoisuuden arviointiin. Eri hiekkalaaduilla havaitaan merkittävää massan vaihtelua. Kaikkien hiekanäytteiden hajoaminen on vertailukelpoista sillä jokaisessa näytteessä hajoavat ainekset ovat luonteeltaan samanlaisia. Lisäksi hajonneen näytteen erilaiset suhteelliset määrät voidaan laskea tutkituissa lämpötiloissa hajoavan alkuaineen vaihtelevan massan mukaan. Näytteitä arvioitiin toistamiseen lämpösykleillä eikä massahäviötä havaittu. Tämä osoittaa hiekanäytteiden olevan lämpövakaita 1100° C:n lämpötilaan asti, mikäli kasaantumia ei muodostu. Analyysissa hiekanäytteiden lämpövakaus osoittaa, että kyseinen hiekkalaatu on soveltuvaa lämpöenergian varastointimateriaaliksi. [8]

Fourier-muunnettu infrapuna-absorptiospektroskopia (FTIR) perustuu infrapunon sähkömagneettisen spektrin vuorovaikutukseen materiaalin hiukkasten kanssa. Absorboitunut energia aiheuttaa atomien ja molekyylien värähtelemisen. Tämä johtaa jaksottaiseen

muutokseen kemiallisten sidosten pituudessa ja niiden välisissä kulmissa. Absorboituneen aallonpituus liittyy atomin massaan ja molekyylien muodostavien sidosten vahvuuteen ja molekyylin geometriseen muotoon. Nämä tekijät mahdollistavat kyseisen yhdisteen tunnistamisen. [10] Esimerkiksi lämpögravimetrisessä analyysissä syntyvät haitalliset kaasut, kuten hiilidioksidi seulotaan infrapuna-absorptiospektroskopiolla [8].

Röntgen diffraktio -tekniikka (XRD) on yksi analyttisistä tekniikoista, joka antaa tietoa kiderakenteesta, kemiallisesta koostumuksesta ja materiaalin fyysisistä ominaisuuksista. [6] Sekä röntgen diffraktio, että infrapuna-absorptiospektroskopia ovat molemmat koherentteja menetelmiä. FTIR-spektroskopia on osoittanut, että lämmityksellä on selvä vaikutus hiekan rakenteeseen. Hiekan kuumennuksen jälkeen tapahtuvat vaihesiirrot ja kemialliset reaktiot voidaan todentaa XRD-kuvioiden ja FTIR-spektrin avulla. Hiekkanäytteiden sähkövastukset ovat erilaiset. Sähköiset mittaustulokset osoittavat, että luonnonhiekkassa on suuri sähköinen resistiivisyys ($6 \times 10^{14} \Omega \text{ cm}$). Tätä voidaan perustella eristetyllä kiderakenteella kvartsista ja kipsistä XRD- ja FTIR-tekniikoilla. Kvartsin sähköinen resistiivisyys on välillä $4 \times 10^{12} - 2 \times 10^{16} \Omega \text{ cm}$ ja kipsin $1,21 \times 10^{14} \Omega \text{ cm}$. Eri lämpötiloissa lämmitetty hiekka johtaa eri faasien ja kemiallisten muunnosten muodostumiseen, joidenkin yhdisteiden rakenteiden muuttumiseen, toisten katoamiseen ja uusien yhdisteiden ilmaantumiseen. Kaikki tämä aiheuttaa hiekan sähköisen resistiivisyyden muutoksen, riippuen uusista yhdisteistä. [10]

Lämpötekniisten ominaisuuksien kuten tilavuuslämpökapasiteetin, lämmönjohtavuuden ja termisen diffusiteetin mittaamisessa hyödynnetään lämpöominaisuuksien analysaattoria. Analysaattorissa on kaksi neulaa, joiden halkaisija on 1,3 mm ja pituus 30 mm. Tämä menetelmä sopii hyvin huokoisille ja rakeisille materiaaleille kuten hiekalle ja kiville. Menetelmän mittausalue $0,5-4 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ tilavuuslämpökapasiteetille, $0,02-2 \text{ W/mK}$ lämmönjohtavuudelle ja $0,1-1 \text{ mm}^2/\text{s}$ termiselle diffusiteetille. Termistä diffusiteettiä mittaavan sensorin tarkkuus $\pm 10 \%$. [4]

3. LÄMPÖENERGIAJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU

Tarkoituksena on analysoida pakatun säilytysjärjestelmän käyttöä kiinnittäen erityistä huomiota säilytysmateriaalin kokoon ja ominaisuuksiin sekä lämpöenergian varastointiin ja vapauttamiseen.

3.1 Lämpöenergian varastointimuodot

Lämpöenergian varastointi (TES) käsitteenä voidaan määritellä useilla tavoilla. TES-järjestelmä voidaan luokitella sen mukaan, millä lämpötila-alueella liikutaan. Matalan lämpötilan lämpövarastoinnissa, kuten jäädytetyllä vedellä, faasimuutosmateriaaleilla tai jäälämpövarastoinnissa on alhainen hyötysuhde 40 %–50 % luokkaa. Keski- ja korkean lämpötilan TES-laitteet toimivat ihmisen mukavuuslämpötilan ulkopuolella olevissa lämpötiloissa, kuten rakennusten lämmityksessä. Keski- ja korkean lämpötilan TES-laitteet, kuten sulan suolan käyttö lämmönvarastointiväliaineena toimivat tyypillisesti yli 300 °C:n lämpötiloissa ja niitä käytetään myös keskitettyissä aurinkosähkön sovelluksissa (CSP). TES-järjestelmät voidaan luokitella myös seuraaviin luokkiin, jotka ovat järkevä, latentti ja termokemiallinen (sorptio). Järkevä TES-muoto hyödyntää varastointiväliaineen ominaislämpöä energian varastointiseksi ja vapauttamiseksi. Latenttilämpömuodossa voidaan varastoida ja vapauttaa latenttilämpö tallennusväliaineen faasinmuutoksen kautta. Sorptiossa energia imeytyy tai vapautuu kahden aineen välisen palautuvan reaktion perusteella. [11,12]

Järkevän lämpöenergian TES-muodossa väliaineena voi olla esimerkiksi vettä tai soraa. Järkevät lämmön varastointimateriaalit ovat lämpöstabiileja korkeissa lämpötiloissa ja ovat näin eniten käytettyjä TES-materiaaleja korkean lämpötilan sovelluksiin. Lisäksi järkevät varastointimateriaalit ovat yleensä edullisia materiaaleja lukuun ottamatta nestemäisiä metalleja ja lämpö-öljyjä. Järkevien lämmönvarastointimateriaalien haittapuoli on lämpöstabiilius purkausprosessin aikana. Lämmön vapauttamisen jatkuessa välittäjäaineen ulostulolämpötila alkaa laskea vähitellen ajan kuluessa. Latenttilämpöön verrattuna materiaalien ominaislämpö 50–100 kertaa pienempi ja täten lämpöenergian varastointitiheys on pienempi. Latenttilämpövarastointimateriaalit varastoivat latenttilämpöä jatkuvan vakio- tai lämpötilan prosessin kuten olomuotomuutoksen aikana.[12] Tämän lämpöenergian varastointijärjestelmän etuja on siis edullisuus, yksinkertaisuus ja helppo hallittavuus. Haittoina on suuri tilavuus, alhainen energiatiheys, geologiset vaatimukset. Nykyinen tilanne on keskittyä suuren mittakaavan suunnitteluun tehtaissa.[11]

Latenttilämpöenergian TES-muodossa on yleensä suuri energianvarastointi, tiivis varastojarjestelmä ja vakio faasinmuutoslämpötila. Latentit materiaalit erityisesti orgaanisen lämmön varastointimateriaalit vaikuttavat alhaiseen lämmönjohtavuuteen (alle 0,2 W/mK), merkittävään tilavuuden muutokseen ja syttyvyyteen. Alhainen lämmönjohtavuus voi johtaa hitaaseen lataukseen ja vapauttamiseen, mikä voi heikentää järjestelmän tallennustehoa. Muita haittoja on kiteytyminen ja mahdollinen korrosio. Tällaisten järjestelmien sovellusalueita ovat teollisuus-, asuin-, liikenne- ja uusiutuvan energian järjestelmät. Latenttilämpöenergian hyödyntämisen nykyinen tilanne on prototyyppien kehittäminen laboratorioympäristössä. [11,12]

Termokemiallisessa TES-muodossa sorptio on yleinen ilmiö, joka syntyy absorboivan ja kylmäaineen vuorovaikutuksesta. Se siis perustuu näiden kahden aineen väliseen palautuvaan reaktioon, jossa on endoterminen hajoaminen ja eksoterminen synteesisprosessi. Sorption etuina on korkea energiatiheys ja tiivis koko. Mahdollisia haittoja on heikko imeytyminen pedin lämmönsiirrossa. Sorptiolämpöenergian hyödyntämisen nykyinen tilanne on prototyyppien kehittäminen laboratorioympäristössä.[11]

Lämpöenergian varastointijärjestelmä (HTTESS) käsittää kokonaisjärjestelmän layoutin ja varastoastian ja varastomateriaalin suunnittelun. Lämpövaraston lataamista varten kylmä ilma ohjataan tuulettimella ilma-ilma-lämmönvaihtimen kautta latauslämmönvaihtimeen. Siellä ilmaa lämmitetään aurinkopaneelien lämmöllä, jonka välittäjäaine siirtää (HTF). Kuuma ilma ohjataan säilytysastiaan, jossa lämpö siirretään varastointimateriaaliin kuten hiekkaan. Varastosta poistumisen jälkeen ylimääräinen lämpö hyödynnetään ilma-ilma-lämmönvaihtimessa ympäröivän ilman lämmittämiseen. Varaston lämpöenergian vapautustilassa ilma ohjataan varastoon, lämmitetään ja siirretään sen jälkeen voimalaitoksen vesihöyrysykliin. Jos yksittäisen moduulin ulostulolämpötila on alle vaaditun lämpötilan niin ilma ohjataan seuraavaan varastomoduliin. Tämä mahdollistaa lähes tasaisen lämpötilan höyrykattilan sisääntulossa.[13]

3.2 Varastointimateriaalin vaikutus lämmönsiirtoon

Varastointimateriaalin koko on yksi tärkeä muuttuja lämpövarastointijärjestelmän suunnittelussa. Lämpötilakäyttäytyminen johtuu vahvasti kiven koosta. Pienirakenteinen materiaali, jonka halkaisija on 2 millimetriä ja pieni massa, osoittavat erittäin nopeaa lämpötilan nousua. Kiven halkaisijan kasvaessa 8 millimetristä 15 millimetriin havaitaan hitaampaa lämpötilan muuttumista. Ero ulkopinnan ja sisäytimen välillä on merkittävämpi. Lämpötilakäyttäytyminen kivien läpi riippuu kahdesta kriittisestä tekijästä kiven lämmön-

johtavuudesta ja kiven pinnan ja ympäröivän ilman välistä konvektiosta. Jos pinnat kuumenevat hyvin nopeasti ja kiven ydin pysyy kylmänä esimerkiksi huonon lämmönjohtavuuden tai leveän halkaisijan takia, kiveen voidaan siirtää vain pieni määrä lämpöä.[8]

Hiukkasmateriaalin kuumentamiseksi voidaan hyödyntää suoria hiukkasvastaanottimia tai ilma-hiukkaslämmönvaihtimia. Teknologinen vaihtoehto lämmön purkamiselle on liikkuva petilämmönvaihdin (MBHX), jossa rakeisten hiukkasten kuljetus (CSP) järjestelmän sisällä voidaan toteuttaa kauha – ja hihnakuljettimilla. Hiukkasten materiaalin on kestävä korkeita lämpötiloja ja korkeita lämpötilojen muutoksia, koska materiaalia käytetään jopa 1000° C:n lämpötiloissa ja se käy läpi syklisen lämpökuorman lataamisen ja vapauttamisen. Lämmön hyödyntämiseksi tarvitaan sopivia termofysikaalisia ominaisuuksia, kuten suuri lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti. Materiaalin hiukkaset voivat keskenään aiheuttaa hankaavaa kulumista. Myös lämmönsiirtoväliaineen virtauskäyttäytyminen on otettava huomioon. Varastoinnin väliaineen materiaalia valittaessa on otettava huomioon termofysikaaliset ja termomekaaniset ominaisuudet. Riittävän termisen tasapainon saavuttamiseksi tarvitaan hyviä käsittelyominaisuuksia ja materiaalin irtonaisuutta sekä riittävää virtauskäyttäytymistä. Haluttu varastointimateriaalin raekoko on välillä 0,5–3,0 millimetriin. Hiukkas pohjaisen CSP- järjestelmän toimintaolosuhteiden varmistamiseksi materiaalin käyttöiän aikana on vältettävä hajoamista ja siitä seuraavaa raekokojakauman vaihtelua, koska tämä lisäksi painehäviöitä ja näin vaikuttaa materiaalin virtauskäyttäytymiseen. Korkeat lämpötilagradientin muutokset hiekkapartikkelin sisällä lisäävät sen sisäisiä rasituksia ja voivat näin vaikuttaa raekokojakauman muutokseen. Reologisten ominaisuuksien tuntemus on olennaista, jotta voidaan arvioida materiaalin virtauskäyttäytymistä. Reologiset mittaukset on tehty hyödyntäen rengasleikkauskennoa Powder Flow Tester -mittaustekniikkaa. Tämän mittaustekniikan avulla voidaan määrittää muita reologisia parametreja kuten sisäinen kitkakulma ja massatiheys. Mittauksien perusteella voidaan määrittää kriittiset suunnitteluparametrit.[14]

Johtumista pidetään merkityksellisempänä lämmönsiirtomuotona verrattuna konvektioon ja säteilyyn. Ilman ja veden konvektiota hiekanjyvien välillä huokosissa ja säteily hiekanjyvien välillä on vähäistä verrattuna johtumisessa siirtyneeseen lämpöön. Suunnitteluparametreja tarkasteltaessa tehokkaan johtavuuden yleinen lisääntyminen lämpötilan kanssa johtuu lämpösäteilyn lisääntyvistä osuudesta korkeimmissa lämpötiloissa. Myös materiaalin suurempi raekoko ja alhaisempi huokoisuus vaikuttaa suurempaan tehokkaampaan johtavuuteen. Tämä vaikutus näkyy hiukkasten välisten kontaktien vähentyneenä määränä vähentäen suurempien hiukkasten lämpövastusta. Myös säteilyvastus pienenee pienemmällä hiukkasmäärällä tietyllä etäisyydellä. Epäsäännöllisen muotoiset hiukkasista koostuvat kappaleet osoittavat hieman etenevämpää johtavuuden nousua

lämpötilan kanssa kuin pallomaiset hiukkaset kuten kvartsihiekkä. Kahden vierekkäisen ja ei-pallomaisen hiukkasen säteilevät pinnat ovat lähekkäin, mikä johtaa lisääntyneeseen lämmönsiirtoon. [14]

Keskitetyn aurinkosähkön (CSP) tarkoitus on hyödyntää lämpöenergian varastointijärjestelmiä (TES) aurinkoenergian varastoinniseksi lämpöenergian muodossa. Vaikka keskitetyn aurinkosähkön hyötysuhde riippuu kaikkien komponenttien, kuten keräinten, vastaanottimien, lämpöenergian varastointijärjestelmän, lämmönvaihtimien, turbiinien ja generaattoreiden suorituskyvystä, niin TES-järjestelmien suorituskyky on ratkaisevin tekijä. Tällä hetkellä TES-järjestelmissä on monenlaisia tekniikoita. CSP-laitokset käyttävät TES-järjestelmiä korkeammassa lämpötiloissa, koska se parantaa laitoksen Rankine-syklin tehokkuutta. Alemman lämpötilan TES-järjestelmiä käytetään esimerkiksi seuraavilla sovellusalueilla, kuten rakennusten tilalämmityksessä ja veden lämmityksessä aurinkoenergialla. Sovellukset, kuten talon tilalämmitys vaatii matalan lämpötilan TES-järjestelmän alle 50°C:tta. Toisaalta sähkön tuottaminen vaatii korkean lämpötilan TES-järjestelmän yli 175°C:tta.[15]

Yksi vaihtoehto on hienorakenteisen hiukkasmateriaalin käyttö varastointi- ja lämmönsiirtovälineenä CRS-järjestelmissä (engl. Central Receiver Systems) Etuina on, että raaka-aineet materiaalit mahdollistavat CSP-järjestelmissä korkeat prosessilämpötilat ja niitä voidaan käyttää sekä lämmönsiirto- että lämmönvarastointivälineenä, mikä tarjoaa suurempia voimalaitoshyötyjä ja mahdollistaa näin kustannussäästöjä verrattuna sulaaan suolaan, joka on tällä hetkellä yleisin CSP:ssä käytetty lämmönsiirtoneste. [14]

TES-järjestelmien suorituskyky riippuu valittujen lämpöenergian varastointimateriaalien ominaisuuksista. Materiaalien sulamispiste tulisi olla mahdollisimman lähellä TES-järjestelmän vaadittua käyttölämpötila-alueetta. Suuri tiheys parantaa energian varastointitiheyttä, mikä vähentää TES-järjestelmän tilavuutta. Suuri latenttilämpö ja ominaislämpö parantavat järjestelmän energian varastointitiheyttä. Korkea lämmönjohtavuus lisää lämmön varastoinnista ja vapautumisnopeutta. Varastointimateriaalin tulisi jäätymään mahdollisimman lähellä sen jäätymislämpötilaa. Varastointimateriaalin edullisuus vähentää pääoma- ja käyttökustannuksia. Varastointimateriaalia pitäisi olla myös runsaasti saatavilla.[15]

Lisäksi varastointimateriaalin on oltava termisesti stabiili eli sen ei pitäisi hajota korkeissa lämpötiloissa. Tämä mahdollistaa materiaalille laajemman käyttölämpötila-alueen ja suuremman energiavarastointikapasiteetin. Myös materiaalien ominaisuuksien tulisi olla vaikaita sekä lämmitys, että jäähtymisen jälkeen. Varastointimateriaalin korkea ke-

miallinen stabiilius pidentää energiavaraston käyttöikä. Tilavuuden muutos materiaaleilla tulisi olla minimaallinen. Materiaaleilla tulisi myös olla alhainen lämpölaajenemiskerroin. Suuret tilavuuden muutokset lisäävät säiliön vaadittua kokoa. Suuri tiheys ero olomuotojen välillä aiheuttaa ongelmia. Varastointimateriaalien on myös oltava myrkyttömiä eli ne eivät saa olla haitallisia käyttäjien terveydelle ja ympäristölle. Korrosoimattomuus on tärkeää, sillä korrosoivat materiaalit lyhentävät energiavarastosäiliöiden elämää säiliöiden korroosion vuoksi. Materiaalien tulee olla lisäksi syttymättömiä ja räjähtämättömiä. Materiaaleilla tulisi olla myös alhainen höyrynpaine käyttölämpötila-alueella. Korkea höyrynpaine vaatii paineenkestävyyttä korkeissa lämpötiloissa. Se vaatii myös kalliita eristeitä. [15]

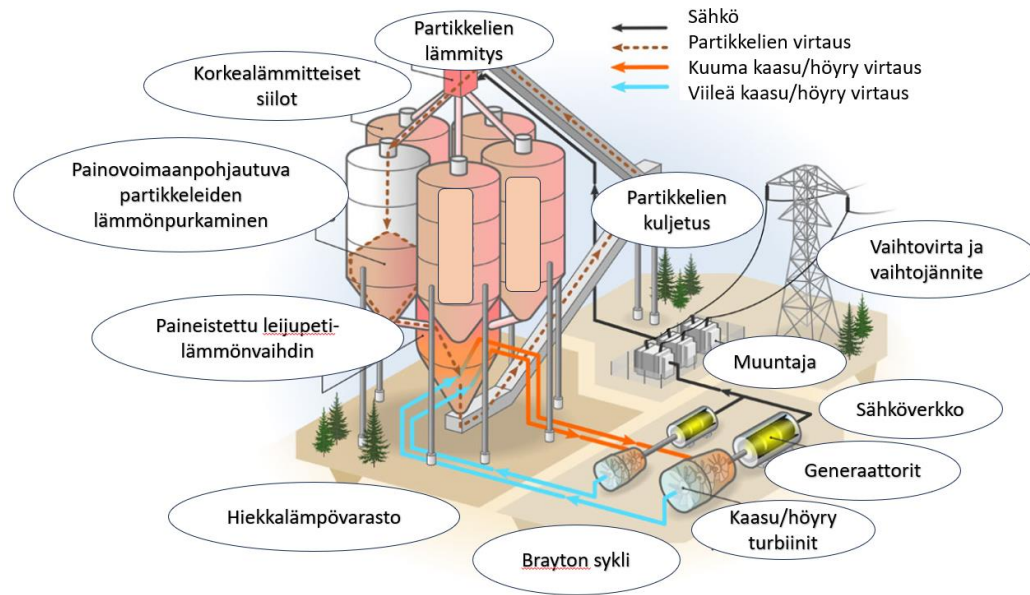
Hiekan mineraalinen koostumus on otettava huomioon termisiä ominaisuuksia tarkasteltaessa ja järjestelmiä suunniteltaessa. Länsi-Afrikan hiekan kvartsipitoisuus voi olla jopa 80 % [4]. Tällöin kvartsin ominaisuudet, kuten uudelleen kiteytysprosessi ja inversio on huomioitava. Kvartsin inversiolämpötila on noin 573 °C. Kvartsihiekan säännöllinen muoto ja sileä pinta sekä homogeeninen raekokojakauma selittävät sen virtaavuuden. [8] Materiaalia valittaessa on otettava huomioon sen mahdollinen hajoavuus joko voimakkaan lämpenemisen tai kulumisen seurauksena. Hajonneet hiukkaset menettäneet alkuperäisen pyöristetyn muotonsa. Molemmat vaikutukset vaikuttavat kriittisen kaarevan ulottuvuuden lisääntymiseen. Kvartsihiekan kriittinen leveys voi kasvaa 7-kertaiseksi. [14]

Sisäinen kitkakulma on massan välisen kitkan mitta. Kitkakulma ja massatiheys lisääntyvät kulumisen vuoksi. Kvartsi faasit ovat alttiita nopeille lämpötilan muutoksille kvartsin inversion takia. Näiden vaikutusten estämiseksi suositellaan kohtalaista jäähdytysnopeutta tai lämpötilatasoa, joka ei sisällä inversiolämpötilaa. Koska jälkimmäistä on vaikea toteuttaa voimalaitossovelluksessa, niin suositellaan toteutusta matalalämpövuolla kyseisen lämpötila-alueen sisällä. Kulumista syntyy kitkajännityksistä hiukkasten massa- ja kahdenkeskisten törmäysten vuoksi. Kulumiseen voidaan vaikuttaa suunnittelemalla virtauskanavan leveyden suuruus leikkausvyöhykkeen hiukkaskerroksien välisten liukumisten minimoimiseksi. Myös normaalia alhaisempi seinämän jännitys auttaa ehkäisemään kulumista. Siksi on tärkeää optimoida varaston säilytyskorkeuden ja leveyden suhde. Sileät seinät, leveät kanavat, pieni irtotavaranopeus ja irtotavaran kuljetus voivat tehokkaasti estää hiukkasten mekaanista hajoamista. Toisaalta hajoamisella on merkittävä vaikutus virtauskykyyn, joten raekokojakauma ja hiukkasen muodon muutokset on otettava huomioon mitoituksessa. [14]

3.3 Lämmönvarastointi- ja vapautusmenetelmäjärjestelmät

Lämmönvarastoiminen tehokkaasti mahdollistaa laitoksen kapasiteettikertoimen ja kokonaisyötysuhteen kasvattamisen. Aurinkolämpösähkötuotanto suuressa mittakaavassa mahdollistaa sähköntuotannon mukauttaminen kysyntään, tuotannon laajentamisen ei-aurinkosäteilykausiin ja sähköntuotannon vapauttamisen välttämällä ei-toivottuja tuotantohuippuja. Lisäksi lämpöenergian varastointijärjestelmiä (TES) pidetään nykyään olennaisena osana CSP-laitoksia, mikä osaltaan vähentää sähkökustannuksia ja kasvattaa laitoksen vuotuista aurinkosähköhyötysuhdetta tarjoten laajemman potentiaalisen CSP-tekniikalle. Hyötysuhteen kasvattaminen on keskimäärin 0,8 % luokkaa vertailtaessa aurinkosähköhyötysuhteen tuotantoa varastoinnin ja ilman varastointia kanssa.[16]

Kiinteiden hiukkasten lämpöenergian varastointiin perustuvaa ylikriittistä CO₂-kiertoista Brayton-aurinkosähköjärjestelmää ehdotetaan keskitetyn aurinkovoiman (CSP) tehokkuuden parantamiseksi. Ylikriittisessä CO₂ Brayton -syklin CSP-järjestelmässä on käytetty kiinteitä hiukkasia, kuten hiekkapartikkeleja, jotka ovat fysikaalisesti ja kemiallisesti stabiileja 1000 °C:n lämpötilassa HTF- ja TES-materiaaleina. Tämä järjestelmä sisältää heliostaattikentän, kiinteiden hiukkasten aurinkovastaanottimen, kuuma- ja kylmäsäiliöt, lämmönvaihtimen ja ylikriittisen CO₂-teholohkon. Auringonvalo on keskittynyt kiinteisiin hiukkasiin aurinkovastaanottimeen heliostaattikentän kautta, jossa hiukkasia kuumennetaan. Lämmitetyt hiukkaset varastoidaan kuumaan säiliöön, minkä jälkeen ne menevät lämmönvaihtimeen siirtämään lämpöä CO₂:n kanssa. Lämmön vapauduttua hiukkaset siirretään kylmään säiliöön, minkä jälkeen ne kuljetetaan uudestaan kiinteiden hiukkasten aurinkovastaanottimeen hissien kautta. Ylikriittisen CO₂-syklin ulostulolämpötila on yli 700 °C:tta. Sulasuolajärjestelmän käyttölämpötila vaihtelee lämpötilasta 290°C:sta – 565 °C:seen, mikä rajoittaa sen soveltamista termodynaamisissa sykleissä. Kiinteiden hiukkasten tehokas lämmönjohtavuus ja syklinen terminen stabiilius ovat tärkeitä ylikriittisen hiilidioksidin CSP-sovelluksille.[9] Kuvassa 1 on esitetty Brayton-aurinkosähköjärjestelmän toiminnan periaatteen kuvaus.



Kuvassa 1. Brayton-aurinkosähköjärjestelmän toiminnan havainnollistaminen, perustuu lähteeseen [17]

Vaihtoehtoisena ratkaisuna on paineilmaenergian varastointi (CAES), joka havaittu luotettavaksi vaihtoehdoksi perinteisille hydraulikkajärjestelmille. Siitä huolimatta, mikäli puristuslämpö menetetään, niin hyötysuhde rajoittuu karkeasti alle 50 prosenttiin. Tämän jälkeen TES-osajärjestelmän yhdistäminen mahdollistaisi tämän lämmön, joka teoriassa johtaisi jopa 70 prosentin hyötysuhteeseen. Tämän TES-yksikön tulisi toimia yhdestä kolmeen lataus- ja purkujaksoa päivässä lämpötila-alueella 50–650 °C:tta käytettäessä paineilmaa lämmönsiirtonesteinä. Tällaiset toimintaparametrit ovat liian haastavia järkevälle lämpöpohjaiselle TES-materiaalille. Näin ollen, voidaan vain harkita korkean lämpötilan tulenkestäviä materiaaleja, jotka yleisesti ottaen ovat liian kalliita ja aiheuttavat liian suuren ympäristöjalanjäljen tällaiselle osajärjestelmälle. Täten matalahintaisia ja ympäristöystävällisiä materiaaleja tarvitaan tulevaisuuden CAES-tekniikoiden kehittämiseen. Itse sovellus rajoittaa sopivan varastointimateriaalin valintaa, kuten toimintalämpötila-alue, varastointikapasiteetti, teho ja alhainen hinta. [16]

Aktiiviset järjestelmät hyödyntävät pumppaustyötä lämmönsiirtonesteiden (HTF) kierrättämiseen latauksen ja vapauttamisen aikana. Suuren mittakaavan TES-järjestelmissä pitkät putkilinjat ja viskositeetti johtavat suureen paineen putoamiseen. Korkea lämpövuoto ja korkea lämpötila vaativat nopeaa lämmönsiirtonopeutta suuremmalla massavirralla pakotetun konvektion kautta. Nämä tekijät edellyttävät HTF:n kiertoa pumppaamisen kautta. [7,16]

Lyhytaikaiset TES-järjestelmät toimivat korkeammassa lämpötilassa, pienemmässä kapasiteetissa ja koossa. Lyhytaikaiseen varastointiin soveltuvat varastointimateriaalit,

jotka toimivat korkeissa lämpötiloissa, kuten sulat suolat ja nestemäiset metallit. Pitkäaikaiset kausiluonteiset TES-järjestelmät varastoivat lämpöä alhaisissa alle 80°C lämpötiloissa ja vaativat suuren määrän varastointimateriaalia ja erittäin suuren kapasiteetin. Edullista luonnollisesti saatavilla olevaa järkevää lämmönvarastointimateriaalia, kuten kiveä, hiekkaa ja vettä, käytetään pitkäaikaisessa kausivarastoinnissa varastointimateriaalin leikkauslujuuden, taloudellisen edun ja ympäristöystävällisyyden vuoksi. Kemialliset varastointimateriaalit ovat teoriassa lämpöhäviämättömiä materiaaleja ja soveltuvat näin pitkäaikaiseen lämmönvarastointiin. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi tarvitaan riittävä eristys säilytysajan pidentämiseksi.[7]

Säiliön suunnittelu vaikuttaa voimakkaasti taloudellisiin kokonaiskustannuksiin. Mallit, kuten kiintokerrossysteemi ja leijupeti ovat kalliita. Kiintokerrossysteemissä kivi- ja hiekkapohjainen yksisäiliöinen termokliininen nestevarasto, jossa jäykemmät kiinteät betoniseinät ovat halvemmat vaihtoehdot. Tyypillisiä säiliömateriaaleja on teräsbetoni ja ruostumatonteräs. Tyypillinen eristysmateriaali on kuitulasi. Pienemmät säiliöt maksavat vähemmän, joten varastointiväliaine, jolla on huono tilavuusenergian varastointitiheys lisää säiliökustannuksia. Varastointiväliaineen korkeampi höyrynpaine johtaa paksumpiin seinäin ja kohonneisiin kustannuksiin. Lämpöenergian varastointimateriaalin yksikkömassan kustannuksia voidaan hyödyntää varastointimateriaalin kokonaiskustannusten arviointiin. Varastomateriaalikustannuksiin voi kuulua myös esimerkiksi lämmönjohtavuuden parannuskustannuksia.[7]

4. HIEKKA-AKKUJEN SOVELLUSKOHTEET

Tässä luvussa käsitellään hiekka-akkujen sovelluskohteista passiivista kiintokerrossysteemiä, termokliinistä lämpövarastoa ja leijupetisysteemiä. Tarkoituksena on keskittyä hiekka-akkujen eri sovellusten ominaisuuksiin, etuihin ja mahdollisiin rajoitteisiin.

4.1 Passiivinen kiintokerrossysteemi

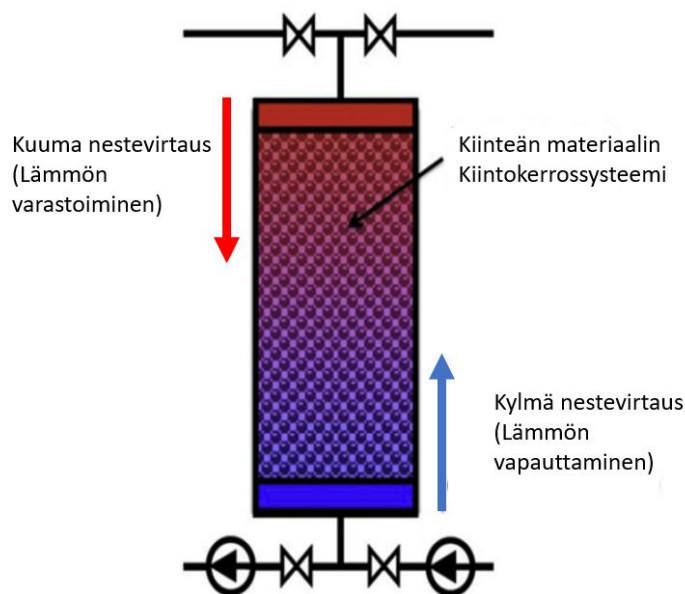
Yksi hiekka-akkujen sovelluksista on passiivinen kiintokerrossysteemi (engl. Packed bed systems). Kiintokerrossysteemissä TES-järjestelmissä on eristetty säiliö, jossa on kiinteä peti täyteainetta, joka toimii ensisijaisena lämmönvarastointivälineenä. HTF-nestettä käytetään pakatun pedin lataamiseen ja vapauttamiseen lämmönsiirrolla suoran pintakosketuksen kautta ilman lämmönvaihtimen tarvetta. Suoralla kosketuksella saadaan suuri kosketuspinta-ala lämmönsiirtoon, mikä parantaa tehokkuutta. Kiintokerrossysteemissä on tunnusomainen lämpötilan kerrostumavaikutus pedin läpi.[7]

Termokliinijärjestelmät käyttävät nestettä lämmönsiirtonesteenä täyteaineilla, jotka on pakattu kerrokselliseen muotoon. Nesteeseen varastoituu osa koko varastoidusta lämpöenergiasta. Kiintokerrossysteemissä on kaasumaista lämmönsiirtonestettä (HTF), kuten ilmaa, joka toimii pelkästään lämmönsiirtonesteenä ja täyteaine pedissä varastoi koko lämpöenergian. Tyypillisiä fluideja ovat ilma, lämpö-öljyt ja kaasut.[7]

Tyypillisiä pedin täyttömateriaaleja ovat esimerkiksi kivet, sora ja hiekka. TES:n käyttölämpötila-alueetta rajoittaa täyteaineen lämpöstabiilius. Maan materiaalit, kuten kivet, sora ja hiekka ovat eniten käytettyjä täytemateriaaleja ja tällaiset järjestelmät toimivat keskilämpötila-alueella 50°C – 300°C. Pakatun pedin TES-järjestelmissä lämpö varastoidaan täyteaineiden lämpönä. Pakatun pedin TES-järjestelmät järkevillä lämpöpetimateriaaleilla toimivat vaihtelevalla ulostulolämpötilalla. Aurinkoilmalämmittimien tapauksessa tietyn päivän tekijät, kuten auringon säteilystä, ympäristön lämpötilasta, lämmönsiirtonesteen lämpötila aurinkokeräimen sisääntulossa ja kuormitus johtavat lämmönsiirtonesteen vaihtelevaan lämpötilaan aurinkokeräimen ulostulossa. Aurinkokeräimien ulostulossa kuuma lämmönsiirtoneste (HTF) lataa pakatun pedin ja lämpötila, johon pakattu peti lämmitetään, vaihtelee esimerkiksi täytemateriaalin mukaan. Lisäksi lämmön vapautumisen aikana pedin lämpötila laskee nopeasti. Toisena ongelmana on toistuvat lämpösyklit, jotka johtavat epätasaiseen lämpölaajenemiseen ja kokoonpuristuvuuteen petimateriaalien, kuten kiven ja säiliömateriaalien, kuten teräksen, välillä. Pakatun pedin

TES-järjestelmän vaikuttavuusparametreja on esimerkiksi HTF-massavirtaus, sorakoko, säiliön kokosuhte, HTF-painehäviö pedin yli, pedin huokoisuus ja pedin mitat. Tyypillisiä pakattujen järjestelmien käyttökohteita ovat aurinkoilmalämmittimet. [7]

Passiivinen kiintokerrossysteemi rakentuu putkista, joiden sisällä on usein varastointimateriaalina käytettyä kvartsiittikiveä, piidioksidia sekä hiekkaa. Näiden putkien läpi virtaa aurinkopaneelien avulla lämmitettyä ilmaa. Kiintokerrossysteemin läpi virtaava ilma viillenee sen siirtäessä lämpöä varastointimateriaaliin. Ilma kiertää systeemin ja aurinkopaneelien välillä, kunnes putken lämpötila on lähes vakio kaikkialla. Lämpöä voidaan purkaa varastosta lämmitystä tarvittaessa. Lämpövarastoa purettaessa ilmavirta vaihtuu päinvastaiseksi eli ilmavirtaus lämmittää ympäristöä varastointimateriaalin viilentyessä. Lämpöhäviöiden minimoimiseksi putkisto on asennettu lähelle aurinkopaneeleja ja systeemi on hyvin eristetty. Korkea lämmönsiirtokerroin ilman ja kiinteän aineen välillä aiheuttaa nopean lämmönsiirron ilmasta kiinteään aineeseen. Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistetusti passiivisen kiintokerrossysteemin toimintaperiaate.



Kuva 2. Passiivisen kiintokerrossysteemin toimintaperiaate, perustuu lähteeseen [7]

Varastointijärjestelmän optimaalinen koko riippuu useista järjestelmä parametreista kuten varastointilämpötilasta, materiaalista, varastointilämpöhäviöistä ja käyttöolosuhteista. Passiivisen kiintokerrossysteemin haittoina on toimimattomuus vakiolämpötiloissa ja herkkyys lämpölaajenemiselle. Lämpötilaerot mahdollistavat systeemin toimimisen. Lämpölaajeneminen vaurioittaa putkistoja ja laitteistoja pitkällä aikavälillä, mikäli putkisto ja varastointimateriaali eivät laajene tai kutistu yhtä paljon lämpötilan muuttuessa. [1]

4.2 Termokliininen lämpövarasto

Toinen hiekka-akkujen sovelluksista on termokliininen lämpövarasto (engl. Termocline system). Kivet, hiekka ja sora soveltuvat käytettäväksi täyteaineina yksisäiliöisissä termokliinisissä lämpöenergian varastointijärjestelmässä, jossa ne on pakattu petirakenteesseen astian sisällä. Termokliininen lämpövarasto voi olla suora tai epäsuora. Väliaineen ollessa erillään kyseessä on epäsuora menetelmä.[7]

Suoraa säteilytystä sovelletaan, kun lämmönsiirtoneste (HTF) on suoraan kosketuksissa väliaineeseen, joka kiertää keräinten läpi. Suora kosketus vähentää kalliiden lämmönvaihtimien tarvetta sekä lisää kontaktipinta-alaa lämmönsiirtonesteen ja lämmönvarastointiaineen välillä. Lämpö-öljy on käytetyin lämmönsiirtoneste suorassa lämmönvaihdossa täyteaineilla, kuten kivillä ja hiekalla suurissa CSP-laitoksissa. Myös muita HTF-aineita, kuten ilmaa käytetään pienemmissä aurinkolämpöjärjestelmissä asuintaloissa. Hiekan tai luonnonkivien valitseminen täyteaineeksi voi vähentää lämpöenergian lataamiseen ja vapauttamiseen tarvittavan lämmönsiirtonesteen (HTF) määrää säiliössä jopa 80 %. Paikallinen saatavuus, edullisuus, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus ovat tärkeitä kriteerejä valittaessa pakatun pedin materiaalia. Muita toivottuja ominaisuuksia on korkea pinnan kovuus hankauksen vastustamiseksi, alhainen huokoisuus öljyn tunkeutumisen estämiseksi ja korkea mekaaninen lujuus. Kiven ja hiekan kemiallista koostumusta ja mineralogiaa tutkitaan myös, koska sillä on vaikutusta niiden hajoamiseen, joka aiheutuu lämpö-öljyn virtauksesta pitkällä aikavälillä.[7]

Säiliöjärjestelmät hyödyntävät lämmönsiirtonestettä ensisijaisena lämmön varastointivälineenä ja varastoivat nesteväliaineen joko yhteen tai kahteen eristettyyn säiliöön. Kerroselliset netemäiset termokliinijärjestelmät täyteaineella rakentuvat edullisesta pedin täytemateriaalista, kuten kivistä ja hiekasta. Täytemateriaali on pakattu yhden eristetyn termokliinisäiliön sisään. Halvempi täyteaine toimii siis ensisijaisena lämpövarastovälineenä ja näin vähentää kalliin nestemäisen lämmönsiirtonesteen tarvittavaa määrää. TES-järjestelmien ja suurten voimalaitosten säiliöiden koon vuoksi täyteaineen määrittäminen ja luokittelu on merkittävä tekijä TES-järjestelmiin liittyvien alkukustannusten ja pitkän aikavälin ylläpitokustannusten kannalta. [7]

Täytemateriaaleista ekomateriaalit ovat hyvä vaihtoehto termokliinijärjestelmien täyteaineiksi. Nämä luonnosta peräisin olevat materiaalit ovat edullisia, helposti saatavia, myrkyttömiä, syttymättömiä ja ne toimivat sekä lämmönsiirtopintana tai varastointiaineena. Ekomateriaaleista kvartsihiekkakivellä on hyvä lämpökapasiteetti, joka on keskimäärin $2250 \text{ kJ/m}^3\text{K} - 2800 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ välillä. Ekomateriaalin haittana on epäsäännöllinen koko ja

muoto. Nämä tekijät heikentävät lämpövaraston tehokkuutta. Tehokkaamman säteilytystehtävien saavuttamiseksi termokliinin tulisi olla ohut, jolloin partikkelien halkaisija olisi alle 3 cm: ä. Lämpöä siirtävän väliaineen ja hiukkasten pinnan muotoilulla on vaikutusta lämmönsiirtoprosessin optimoinnissa. Lämpöenergian varastointimateriaalin (TESM) puristuslujuus pitäisi yli 1MPa, korkea lämpösyklin kestävyys, korkea lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus yli 1 W/mK olisi toivottavia ominaisuuksia. Lämmönjohtavuuden vaikutus termokliinienergian varastointikykyyn on hyvin pieni. Eri hiekkalaaduilla on potentiaalia olla hyviä lämmönvarastointimateriaaleja. Ongelmana on kuitenkin hiekan kasaantuminen korkeissa lämpötiloissa. [4]

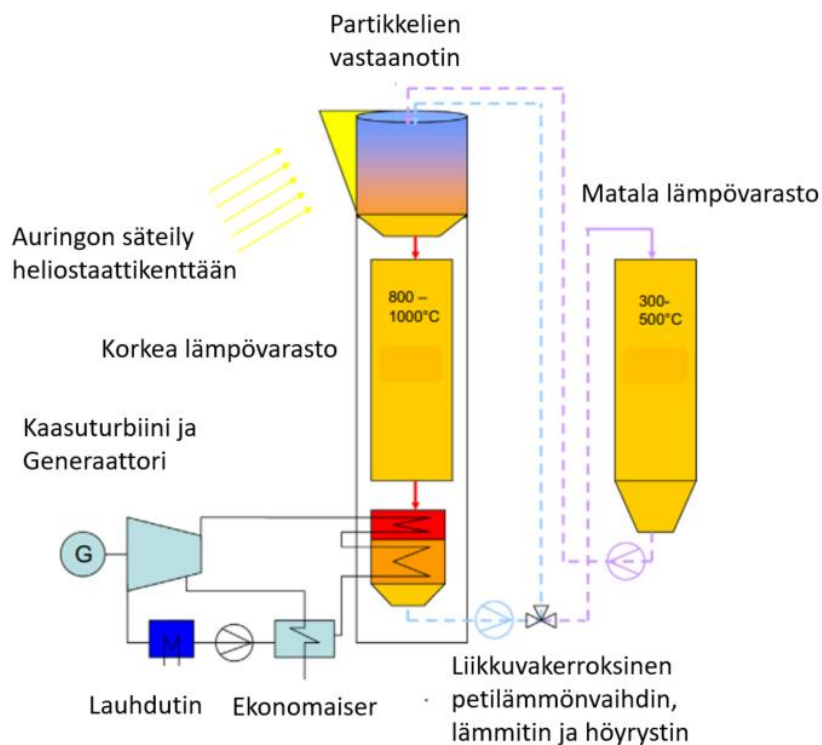
4.3 Leijupetisysteemi

Kolmas hiekka-akkujen mahdollisista sovelluksista on leijupetisysteemi (engl. Fluidized bed systems). Leijupetisysteemissä keskustornityyppisissä CSP-laitoksissa lämpötilat ovat äärimmäisen korkeita. Nestemäisillä lämmönsiirtoväliaineilla, kuten lämpö-öljyllä ja sulilla suoloilla on rajoituksia äärimmäisissä lämpötiloissa. Siksi kiinteät hiukkaset, kuten hiekkarakeet ovat paras väliaine lämmön keräämiseen suoraan säteilystä ja absorboitun lämmön varastoimiseen. Kiinteiden hiukkasten ongelmana on, että niitä ei voi helposti kierrättää nesteen tavoin eivätkä ne voi pyörittää turbiinia. Kun suora kontakti nestemäisen fluidin ja kiinteiden hiukkasten välillä ei ole mahdollista, niin varastoidun lämmön vapauttaminen kiinteistä hiukkasista nestemäiseen fluidiin on vaikeaa. Epäsuoran tyyppisissä lämmönvaihtimissa, joissa on lämmitetyistä hiukkasista koostuva kiinteä peti, jossa lämmönsiirtonopeus kiinteään petiin upotetuissa teräsputkissa virtaavaan nestemäiseen fluidiin on huono. Lämmönsiirtonopeutta voidaan parantaa käyttämällä leijupetisysteemilämmönvaihtimia.[7]

Leijupetisysteemissä on kiinteitä hiukkasia, jotka on seostettu virtaavaan nesteeseen, jolloin hiukkasten kuljettaminen kanavien kautta on mahdollista. Nesteen virtausnopeus kiinteiden hiukkasten kerroksen läpi on riittävän suuri, niin kiinteisiin hiukkasiin syntyvä vetovoima voittaa kiinteisiin hiukkasiin kohdistuvan painovoiman. Pohjassa on verkko kangas, joka mahdollistaa nesteen virtauksen koko kammiossa. Kylmät ja kuumat hiukkaset varastoidaan erillisiin säiliöihin. Eri kokoisia kiviä, kuten pikku kiviä, pieniä sorakiviä käytetään täyteaineena pakatuissa pedeissä, kun taas hiekkaa, jonka raekoko on pienempi 0,074–4,5 mm voidaan käyttää leijupedeissä. Partikkelien vastaanottaja aurinkovoimalassa on leijupedin lämmönvaihtimet, joissa on leijuvia hiekkahiukkasia, jotka toimivat leijupetinä. Teräsputkien läpi virtaava vesi toimii fluidina, joka ajaa turbiineja. Leijupedissä lämpötila pedessä on tasainen. Leijupedissä on ehdotettu ratkaisuksi ulkoista

lämmönsiirtonestettä heikkoon lämmön ja massan siirtoon termokemiallisessa reaktoriissa. Leijupedin avulla voidaan parantaa termokemiallisten TES-järjestelmien suorituskykyä tarjoamalla suuri ominaispinta-ala reaktiolle ja lyhyt viipymäaika kiinteille ja kaasuhiukkasille. [7]

Liikkuvakerroksinen systeemi (engl. Moving Bed Systems) on vastaava kuin leijupetisysteemi, mutta siinä hiukkaset liikkuvat hitaasti alaspäin vinoissa kanavissa gravitaatiovoiman avulla nopean nestevirtauksen sijasta.[7] Kuvassa 3 on esitetty liikkuvakerroksisen petilälämmönvaihdin systeemin periaatekuva.



Kuva 3. Liikkuvakerroksisen petilälämmönvaihtimen periaatekuva, perustuu lähteeseen [14]

Tämän systeemin etuna on, että nesteen pumppaamista ei tarvita, mikä vaikuttaa systeemin suunnitteluun. Liikkuvakerroksisen systeemin lämmönvaihtimessa kuumat kiinteät hiukkasrakeet virtaavat hitaasti teräsputkien ympäriltä, joiden läpi neste, kuten vesi, virtaa ja imee lämpöä. Jatkuvassa väliaineessa hiukkasjyvien välistä mekaanista vuorovaikutusta kutsutaan rasitukseksi. Leijupedissä kiinteät hiukkasjyvät liikkuvat nopeasti alhaisemmissa pitoisuuksissa ja vuorovaikuttavat törmäysten kautta. Liikkuvakerroksisissa systeemissä puolestaan kiinteillä hiukkasjyvillä on tiheä pitoisuus, ja ne vuorovaikuttavat kittakosketusten kautta useiden vierekkäisten hiukkasjyvien kanssa. [7]

5. VAIHTOEHTOISTEN MATERIAALIEN VERTAILU

Tarkoituksena on vertailla järkeviä lämpöenergian varastointimateriaaleja (TES), kuten vettä, jätteitä, lentotuhkaa, suola- ja metalliteollisuuden sivutuotteita, lämpö-öljyä, teräsprosessin kierrätyksen ja kuparin jalostusprosessin jätteitä, alumiiniteollisuuden kuonaa sekä yhdyskuntajätteitä, kuten lasia on tarkasteltu.[16]

Nestemäisen varastointiaineen etuina on, että se voidaan kierrättää helposti ja siten kuljettaa lämpöä tarvittaessa. Tällaista järjestelmää, jossa varastointiväliaine kiertää, kutsutaan aktiiviseksi järjestelmäksi. Myös nesteen kuumentamisen aiheuttaman tiheyseron vuoksi muodostaa lämpögradientin varaston poikki. Tällöin kuuma neste liikkuu ylös ja kylmä neste liikkuu alas erottaen ne. Joitakin järkeviä nestemäisiä lämmönsiirtovälittäjäaineita on esimerkiksi vesi. [15]

Veden hyödyntämisen etuina on, että vettä voidaan kierrättää helposti ja sitä voidaan siten käyttää aktiivisissa järjestelmissä sekä lämmönsiirtonesteinä (HTF), että lämpöenergian varastointimateriaalina (TES). Vesi soveltuu hyvin matalan lämpötilan sovelluksiin ja sen käyttölämpötila-alue on 25–90°C:tta [15]. Sen etuina on myös korkea ominaislämpökapasiteetti, myrkyttömyys, edullisuus ja helppo saatavuus. Lisäksi vettä voidaan käyttää jäänä, nesteenä ja höyrynä. Nestefaasia käytetään alle 100°C:een lämpöenergian varastointiin kuten pientalojen lämmitykseen. Höyryfaasia käytetään korkean lämpötilan lämpöenergian varastointiin höyryakkuina. Jäähdytettyä vettä tai jäätä voidaan hyödyntää kylmässä varastovedessä. Veden haittoina on korkea höyrynpaine ja se aiheuttaa korroosiota. [7]

Yleisesti käytetyin sulan suolan (engl. Solar salt) seos koostuu 60 % natriumnitraatista (NaNO_3) ja 40 % kaliumnitraatista (KNO_3). Sulan suolan sulamispiste on noin 220° C. [7] Suola seoksen toimintalämpötila on rajoitettu 250° C:sta 265° C:seen, mikä tarkoittaa varastointikapasiteetin rajoittamista sekä jatkuvaa tarvetta suoloille lämmönsyöttöön niiden jäätyksen välttämiseksi. Lisäksi suolojen alhainen lämmönjohtavuusarvo on noin 0,5 W/mK, mikä edellyttää monimutkaisten ja kalliiden lämmönvaihtolaitteiden käyttöä. Sulan suolan lämmönsiirtokerroin vaihtelee välillä 3600 W/m²K - 6700 W/m²K [7]. Nitraattisuoloja käytetään CSP:ssä ja niistä noin 60 % on luonnontuotteita. Chile on johtava maa näiden suolojen tuotannossa. Näiden suolojen laajamittainen louhinta Atacaman alueella on johtanut 132 Mt:n jätteisiin ja hylättyihin kaivoksiin 417 km² aavikolla. Vaikka

materiaali olisi tehty luonnonvaroista niin sen ympäristövaikutukset eivät ole merkityksellisiä. Vaihtoehtoisesti synteettisten nitraattisuoloja voitaisiin käyttää TES-materiaaleina, mutta tämä johtaisi kasvihuonekaasujen pitoisuuden nousuun noin 52 %:lla.[16]

Metallit ja metalliseokset ovat vaihtoehtoisia varastointimateriaaleja niiden korkean lämmönjohtavuuden, vakiokäyttölämpötilan ja korkean käyttölämpötilan vuoksi. Korkea käyttölämpötila johtaa termodynaamisen syklin tehokkuuden kasvuun jopa 50 %:lla. Lisäksi metallien sulamis- ja kiehumispisteiden välinen ero mahdollistaa laajan toimintalämpötila-alueen ja suuren järkevän lämmön varastointikapasiteetin. Nestemäisistä metalleista natriumin (Na) lämmönsiirtokerroin vaihtelee $18000 \text{ W/m}^2\text{K}$ – $28500 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nestemäiset metallit parantavat aurinkovastaanottimien tehokkuutta, koska vastaanottimien putken seinämän lämpötila on alhainen ja lämpötilagradientti on myös alhainen. Tämän seurauksena lämpöhäviöiden suuruus on pienempi ympäristöön. Erityisesti magnesium-, sinkki- ja alumiiniseokset kiinnostavia suuren tehon ja nopean lämpövasteen sovellusten puitteissa, mutta niihin liittyy kohtuuttomia kustannuksia ja alttius korroosiolle. Lisäksi natrium aiheuttaa palovaaran sen pyroforisuuden vuoksi. [7,16]

Teollisuusjätteen tai sivutuotteen hyödyntäminen varastointimateriaalina on osoittanut merkittävää potentiaalia varastointikustannuksien alentamiseksi. Jättemateriaaleista yhdyskuntajätteiden poltossa syntyvää lentotuhkaa, asbestia, hiilen lentotuhkaa, teollisuuden kuonaa ja betonia voidaan hyödyntää lämmönvarastointi ratkaisuissa. Tässä vaihtoehdossa on useita etuja, kuten mahdollisuus teollisten prosessien tehokkuuteen ja kustannustehokkuuteen. Erityisesti jotkin jättemateriaalit mahdollistavat korkean lämpötilan lämmönvarastoinnin jopa $1200 \text{ }^\circ\text{C}$:seen riippuen käytetystä TES-systeemistä. Myös teollisuudessa jätetuotteiden hyödyntäminen voi olla hyvä vaihtoehto tehtaiden ympäristöjalanjäljen pienentämiseksi, koska teollisuuden on katettava tuotettujen jätteiden asianmukainen käsittely. Jätteiden ja sivutuotteiden käsittely aiheuttaa yleensä merkittäviä taloudellisia kustannuksia. Päätavoitteina ovat parempien, sopiviin materiaaleihin perustuvien lämmönvarastointilaitteiden käyttöönotto ja teollisuusjätteiden hyödyntäminen. Myös geometrisella konfiguraatiolla, kuten pinotuista aaltolevyistä valmistettuja staattisilla sekoittimilla on vaikutusta lämmönsiirtokertoimien korrelaatioon. Tämä vaatii kuitenkin täydentäviä tutkimuksia.[16]

Lentotuhka koostuu mikrometrin kokoisista hiukkasista, joita esiintyy teollisuuspoltojen tuottamissa kaasumaisissa jätteissä, kuten hiilivoimaloissa ja kiinteiden yhdyskuntajätteiden poltossa. Nämä hiukkaset koostuvat pääasiassa piidioksidista, dialumiintrioksidista ja kalsiummonoksidista. Kierrätetyt keramiikat koostuvat sulatetuista epäorgaanisista jätteistä, kuten lentotuhkasta, asbestista ja metallurgisesta kuonasta. Lasimateriaalin lämpötilakäyttäytyminen riippuu lämpötilasta eli lasin olomuodonmuutos tapahtuu

650°C:n lämpötilassa ja kiteytyshuippu 900°C:n lämpötilassa. Keramiikka on erittäin vaaka koko lämpötila-alueella. Tämä kuvaa sitä, että lasia voidaan käyttää TES-materiaalina alle 600°C:n varastointijärjestelmässä, kun taas keramiikkaa voidaan käyttää kaikilla alle 1100°C:n lämpötila-alueilla. [16] Hienohiekkaa ja muita mikrometrin kokoisia hiukkasia, kuten keramiikkaa tai kuivaa sementtijauhetta tai hiiltä käytetään ilman kanssa keräämään lämpöä suoraan auringon säteilystä. Auringon säteilyn suora absorptio parantaa hyötysuhdetta.[7]

Suola A on alkuperäiseltään muodolta kiteinen natriumkloridi (NaCl). Tämän suolan haittana on rakeiden väliset ilmavälit, jotka heikentävät sen lämmönjohtavuutta. Tämän vuoksi vaihtoehtoina on tiivistää ja muotoilla materiaalia. Vaihtoehtoina lämpösäteilymateriaaleissa on lisätä metallisia lisäaineita, kuten grafiittia, mutta nämä ratkaisut tarkoittavat järjestelmäkustannusten nousua. Edullisempänä vaihtoehtona on veden lisääminen ilmarakojen poistamiseksi ja suolan kiinteän muodon saavuttamista haihduttamalla se myöhemmin. Suola B:ssä on sopivassa suhteessa suolaa ja vettä. Seoksessa on siis 17 % vettä. Lämmönjohtavuus, ominaislämpökapasiteetti ja -tiheys ovat tärkeitä parametreja määritettäessä materiaalin soveltuvuutta lämmön varastointiin. Suolan hyödyntäminen lämmönvarastoinnissa on myös 5:stä 100:aan kertaa halvempaa kuin muut vaihtoehtoiset varastointimateriaalit. Epäorgaanisista materiaaleista suolahydraateilla on houkuttelevia ominaisuuksia, kuten korkea energian varastointitiheys, suhteellisen korkea lämmönjohtavuus, hieman myrkyllinen, ei kovin syövyttävä ja yhteensopiva muovien kanssa. [16] Taulukossa 2 on esitetty vaihtoehtoisten materiaalien ominaisuuksien vertailu.

Taulukko 2. Vaihtoehtoisten materiaalien lämpöfysikaalisten ominaisuuksien vertailu, perustuu lähteeseen [16]

vaihtoehtoiset materiaalit	lämpötila- alue T °C	tiheys kg/m ³	lämpökapasiteetti kJ/kgK	lämmön johtavuus W/mK	lämpölaajenemis- kerroin 1/K
hiekkä	200-700	1602	0,84	0,5-2,5	-
lasi	25-1000	2962-2896	0,714-1,122	1,16-1,59	8,7 * 10 ⁻⁶
keramiikka	25-1000	2600	0,735-1,3	1,3-2,1	4,0 * 10 ⁻⁶
suola A	100-200	1384	0,738	0,33	-
suola B	100-200	2050	0,738	2,84	-
lentotuhka	25-1100	2600-2962	0,714-1,3	1,16-1,59	8,7 * 10 ⁻⁶
asbestikeramiikka	25-1000	3120	0,8-1,034	1,4-2,1	8,8 * 10 ⁻⁶
sula suola	250-265	1899	1,5	0,55	-
nestemäinen metalli (Na)	98-883	1042	1,3	64,9	-

Lämpö-öljyt ovat orgaanisia nesteitä, joilla on hyvä lämmönsiirtokyky. Lämpö-öljyt ovat yleensä värittömiä ja kirkkaita nesteitä. Niiden etuna veteen nähden on, että ne pysyvät nestefaasissa korkeimmissa lämpötiloissa kuin vesi 250 °C:seen lämpötilassa alle normaali ilmanpaineen. Lisäksi lämpö-öljyjen käyttölämpötila alue on 12–400 °C:seen, mikä tarkoittaa suurempaa lämmönvarastointi potentiaalia. Lämpö-öljyillä on myös alhainen höyrynpaine veteen verrattuna. Lämpö-öljyillä on alhainen viskositeetti ja hyvät virtausominaisuudet. Sitä voidaan käyttää aktiivisissa järjestelmissä lämmönsiirtonesteenä (HTF) ja lämpöenergian varastointimateriaalina (TES). Lämpö-öljyt voivat muodostaa termokliiniä nestemäisessä tilassa. Termokliinisessä TES-järjestelmässä on yleensä pakattu peti, jossa on täyteaineina kiviä, hiekkaa ja lämpö-öljyä. Lämpö-öljyillä on etuna sulaan suoloihin nähden, että ne eivät jäädy putkissa, koska niiden sulamispiste on hyvin alhainen alle 12 °C:tta. Lämpö-öljyjen haittana on veteen verrattuna sen pienempi ominaislämpökapasiteetti (2 kJ/kgK) ja ne ovat kalliita. Korkeimmissa lämpötiloissa niiden toiminta-alueen yläpuolella lämpö-öljyt hajoavat reaktioiden, kuten ilman hapettumisen seurauksena tuottaen karboksyylihappoa ja peroksidiyhdisteitä. Tämä nopeuttaa säiliöiden ja putkien korroosiota. Lisäksi lämpö-öljyhöyryllä on palovaara, kun sitä sekoitetaan ilmakehän ilmaan. Lämpö-öljyjen lämmönsiirto-ominaisuuksia voidaan parantaa grafiitilla ja metallioksidoilla. [7]

Järjestelmän lämpötilan ylittäessä lämpö-öljyn lämpötilarajan 400°C, niin sulat suolat ovat ensisijainen lämmönsiirtoneste ja lämmönvarastoinnin väliaine. Niillä on korkea viskositeetti verrattuna lämpö-öljyihin ja veteen. Lisäksi niillä on suuri volumetrinen lämpökapasiteetti, korkea kiehumispiste ja erittäin korkea lämpöstabiiius. Siksi niillä on huonot virtausominaisuudet, jotka lisäävät pumppauskustannuksia. On toivottavaa, että sulamispiste on lähellä ympäristön lämpötilaa ja erittäin korkea kiehumispiste, jotta HTF voi toimia maksimialueellaan. Sulien suolojen etuina on niiden edullisuus, helposti saatavilla, myrkyttömyys ja syttymättömyys. Suolan korkean sulamispisteen takia yleensä yli 200°C, mikä johtaa niiden jäätymiseen putkistossa, koska yöllä ei ole aurinkoenergian kaltaista lämmönlähdettä. Korkeampi kiehumispiste ja lämpöstabiiius korkeassa lämpötilassa tarkoittavat, että ne voivat ylläpitää erittäin korkeaa käyttölämpötilaa, mikä parantaa höyryn Rankine-kierron termodynaamista tehokkuutta.[7]

6. HIEKKALÄMPÖVARASTOJEN KEHITYSPOTENTIALI

Tässä luvussa käsitellään hiekkalämpövarastojen tulevaisuuden kehityspotentiaalia. Alaluvuissa perehdytään hiekkalämpövarastojen mahdollisiin ympäristövaikutuksiin ja tulevaisuuden näkymiin.

6.1 Hiekkalämpövarastojen ympäristövaikutukset

Lämpöenergian varastointi (TES) on avain päästäksemme eroon fossiilisten polttoaineiden polttamisesta. Fossiilisten polttoaineiden polttaminen on seurausta, että emme ole onnistuneet keräämään ja varastoimaan energiaa uusiutuvista lähteistä. Jos lämpöenergiaa ei varastoida niin se haihtuu ympäristöön, mikä edellyttää fossiilisten polttoaineiden polttamista energiatarpeen täyttämiseksi. Energianvarastoinnin perusajatuksena on muuttaa yksi energiamuoto toiseksi, mikä voidaan tehdä tehokkaalla, kustannustehokkaalla ja päästöjä minimoimalla menetelmällä. Tällä hetkellä lisääntynyt energianvarastointi on tärkeää tuettaessa uusiutuvan energian yleistymistä sähköverkossa, koska uusiutuvan energian saatavuus on stokastista. Tarkoituksena on tutkia todennäköistä kustannustehokasta, ympäristöystävällisempää, kestävämpää ja joustavampaa varastointitekniikkaa kuten hiekkaa tai valmistettua metallipalloja romumetallista vaihtoehtona olevalle energian varastointitekniikoille. Tätä tekniikkaa suositellaan käytettävän yhdessä aurinkovoiman tuotannon kanssa korvaamaan aurinkoylijäämää, joka tekee verkosta helpommin hallittavan. [18]

Lämpöenergian varastointijärjestelmien (TES) tarkoituksena on estää lämpöenergian häviäminen varastoimalla ylimääräistä lämpöä, kunnes se kulutetaan. Suurille lämmönlähteille kuten aurinkolämpöenergialle, geotermiselle energialle ja ydinvoimaloille on mahdollista toteuttaa järjestelmä taloudellisesti. Haasteena on lämpöenergian tuotannon ja kulutuksen aikaero eli lämpöenergian kustannusten ero päivän huipputuntien ja off-peak-tuntien välillä. Lisäksi haasteena on lämpöenergian lähteen ja kulutuspaikan välinen etäisyys. Jos lämpöenergiaa ei kuluteta ja säilötä, niin se haihtuu ympäristöön aiheuttaen ilmaston lämpenemistä. Lämpöenergian absorptioprosessin aikana ei tapahdu faasimuutosta. Varastoidun lämmön määrä on verrannollinen varastointimateriaalin tiheyteen, tilavuuteen, ominaislämpöön ja lämpötilan vaihteluun. [18]

Kestävän kehityksen näkökulmasta ottamalla järjestelmällisesti käyttöön erilaisia lämpöenergian (TES) integraatiomuotoja eri sovelluksiin, kuten lämminvesiverkostoon, lämpöpumppuihin, talonrakennusjärjestelmiin ja aurinkokeittimiin. Tästä tutkimuksesta on hyötyä tutkijoiden suunnitellessa kestävämpiä lämpöjärjestelmiä. Ympäristönäkökohdista hiekan alhainen valmistusenergian tarve ja pieni hiilidioksidijalanjälki tukevat kestävä kehitystä.[18]

Toisaalta hiekka on maailman toiseksi hyödynnetyin raaka-aine veden jälkeen. Hiekan käyttö on kolminkertaistunut 20 vuodessa. Hiekan lisääntynyt kaivuu esimerkiksi rannoilta ja merestä aiheuttaa vakavia ongelmia ympäristölle ja lajeille. Jokihiekan kerääminen vaikuttaa joen virtausnopeuden muutoksiin, minkä seurauksena vesi samentuu. Myös rapujen, kalojen ja lintujen elinympäristöt häviävät. Hiekka on vaarassa loppua, koska sen uusiutuminen on hidasta ja sitä kulutetaan nopeammin kuin se ehtii uusiutua eroosion seurauksena. [19] Eli ympäristövaikutuksia on arvioitava tarkkaan erityisesti hiekan louhimisen ja käsittelyn näkökulmasta, sillä ympäristöystävälliset menetelmät ovat tärkeitä kestävä kehityksen kannalta.

6.2 Hiekkalämpövarastojen tulevaisuuden näkymät

Hiekkalämpövarastojen tulevaisuuden näkymät ovat toiveikkaat. Tärkeitä näkökulmia on esimerkiksi uusiutuvan energian varastoiminen, kuten aurinko- ja tuulivoiman, kestävästi tasapainottaen tuotanto – ja kulutushuippuja. Lisäksi tulevaisuudessa tarvitaan menetelmiä parantamaan hiekkalämpövarastojen lämmönsiirtokykyä ja varastointitehoa. Tämä tarkoittaa esimerkiksi lämmöneristeiden, lämmönjohtavuuden ja aurinkokeräinten kehittymistä. Myös hiekkalämpövarastojen kehittäminen laajemmassa mittakaavassa vaatii tutkimusta ja investointeja sekä yhteiskuntarakenteiden muuttumista. Esimerkiksi lämpöenergian tuotannon ja kuluttajan välinen etäisyys aiheuttaa merkittäviä lämpöhäviöitä. Taloudellisista tekijöistä kustannusten minimoiminen ja kilpailukykyisyys, esimerkiksi akkujen kanssa, on keskeisiä tekijöitä tulevaisuudessa menestymisen kannalta.

Tulevaisuudessa seuraavan sukupolven teknologioille korkeammat käyttölämpötilat 800–1000 °C:seen, suuremmat varastointikapasiteetit, kehittynyt kemiallinen ja mekaaninen vakaus, optimoitu ympäristöjalanjälki ja alhaiset kustannukset ovat pakollisia. Tärkeimpiä parannuksia on käyttölämpötila-alue, varastointikapasiteetti ja kokonaisvarastointikustannukset. Näiden ominaisuuksien kokonaisvaltainen parantaminen voisi johtaa aurinkolämpösähkön tuotannon kilpailukykyyn kasvuun. Tarkoituksena on siis optimoida lämpösähkön tuotantolaitoksille parhaiten sopiva energian varastointitekniikka.

Korkea varastoinnin käyttölämpötila-alue noin 1000°C:tta mahdollistaa varastoidun lämmön muuntamisen takasin sähköksi. Myös käytetyn hiekkalämpövaraston varastointi- ja vapautusmenetelmä vaikuttavat lämmönsiirron suunnitteluun. Eli milloin ja miten lämpöä varastoidaan ja vapautetaan hiekka-akusta. Toisaalta TES-kentän taloudellinen jalanjälki ulottuu monille alueille, kuten lämpövoimatuotantoon, rakennuksiin, autoihin, tekstiileihin ja maatalouteen. [7]

Uusiutuvan energian hiekkalämpövarastoja toteuttava tamperelainen yritys Polar Night Energy ja energiayhtiö Vatajankoski rakensivat lämpövaraston, jonka lämmitysteho 100 kW ja varastoimiskyky 8000 kWh. Tämä sata tonnia hiekkaa sisältävä lämpövarasto tuottaa vähäpäästöistä kaukolämpöä Kankaanpäähän. Kyseinen lämpövarasto on mitoiltaan neljä metriä leveä ja seitsemän metriä korkea terässäiliö, joka sisältää hiekkaa ja lämmönsiirtojärjestelmän. Lämpövaraston avulla uusiutuvan energian määrää voidaan merkittävästi lisätä sähköverkossa. Myös hukkalämpöä voidaan käyttää kaupungin lämmitykseen kaukolämpöverkossa. Tämä on askel kohti polttamatonta kaukolämpötuotantoa. Järjestelmässä on suuri kehityspotentiaali tulevaisuutta ajatellen. Tällä hetkellä tarkoitus on keskittyä suuremman mittakaavan laitoksiin eikä yksittäisten pienkotien energiatarpeeseen vastaamiseen. Vatajankoski käyttää varastoitua lämpöä omistamiensa suurteholaskentakapasiteetin vuokraamiseen tarkoitettujen dataservereiden tuottaman hukkalämmön lämpötilan nostamiseen. Näistä servereistä saadun 60°C:sen hukkalämmön lämpötilaa täytyy vielä nostaa ilmaston lämpötilan mukaan 75–100°C:seen ennen sen syöttämistä kaukolämpöverkkoon.[20]

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Hiekkalämpövarastot ovat uusi kehittyvä uusiutuvan energian varastointiteknologia, jonka tavoitteena on ratkaista haasteita aurinko- ja tuulivoiman tuotannossa. Haasteena on uusiutuvan energian stokastisuus sekä kulutuksen ja tuotannon eriaikaisuus. Hiekka koostuu useista alkuaineista ja niiden yhdisteistä. Alkuainekoostumus riippuu hiekan alkuperästä. Hiekkakomponenttien korrelaation tuntemisella voidaan perustella hiekan fyysisiä ja kemiallisia ominaisuuksia. Tällöin tiedetään lämmön ja säteilyn vaikutus näihin yhdisteisiin ja niiden välisiin vuorovaikutuksiin. Alkuainekoostumuksella on vaikutus hiekan termiseen stabiiliuteen, värinmuutoksiin ja mahdollisiin massahäviöihin.

Hiekasta mitataan sen termofysikaalisia, mekaanisia ja optisia ominaisuuksia, jotta sen suorituskykyä voidaan arvioida lämpöenergian varastoinnissa. Lämpögravimetrisessä analyysissä havaitaan massanmuutokset, jolla perustellaan hiekkalaadun soveltuvuutta lämpöenergian varastointimateriaaliksi. Fourier infrapuna-absorptiospektroskopia mahdollistaa infrapunon absorption avulla yhdisteen tunnistamisen. Röntgen diffraktio – tekniikka antaa tietoa kiderakenteesta ja kemiallisesta koostumuksesta perustuen sähköisen resistiivisyyden muutoksiin.

Hiekan on täytettävä riittävät termofysikaaliset ominaisuudet, kuten terminen stabiilius, laaja käyttölämpötila-alue, suuri tiheys, korkea lämmönjohtavuus ja suuri energianvarastointikapasiteetti. Tärkeitä ominaisuuksia on myös alhainen lämpölaajenemiskerroin, myrkyttömyys, korrosoimattomuus, syttymättömyys, räjähtämättömyys ja alhainen höyrynpaine käyttölämpötila-alueella. Lisäksi hiekan edullisuus ja saatavuus vähentävät rahallisia kustannuksia.

Hiekkalämpövarastoiden sovelluskohteita on passiivinen kiintokerrossysteemi, termokliininen lämpövarasto ja leijupetisysteemi. Passiivinen kiintokerrossysteemi perustuu hiekan ja lämmönsiirtonesteen suoraan pintakosketuksella tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Suuri kosketuspinta-ala parantaa lämmönsiirron tehokkuutta. Leijupetisysteemissä hiekkapartikkelit on seostettu virtaavaan nesteeseen, mikä mahdollistaa suuren ominaispinta-alan reaktiolle ja lyhyen viipymääjan hiekkapartikkeleille parantaen näin TES-järjestelmien suorituskykyä.

Hiekan tilalla voidaan hyödyntää vaihtoehtoisia materiaaleja, kuten suoloja, metalliteollisuuden sivuvirtoja tai jätemateriaaleja. Materiaalien on kuitenkin täytettävä riittävät lämpöfysikaaliset ominaisuudet, kuten lämmönjohtumiskyky, lämpökapasiteetti ja laaja käyttölämpötila-alue.

Hiekkalämpövarastojen haasteita ovat lämpöhäviöt ja hiekan kasaantuminen. Hiekkalämpövaraston kaukainen sijainti suhteessa kulutuskohteeseen aiheuttaa lämmönsiirtohäviöitä. Lämpöhäviöihin voidaan vaikuttaa varastosäiliön optimaalisella pallomaisella muotoilulla ja varastosäiliön eristämällä. Hiekan kasaantuminen korkeissa lämpötiloissa vaikeuttaa hiekan varastointia ja estää täten varastosäiliön purkamisen. Syy kasaantumien muodostumiselle on hiekan epäpuhtauksien matala sulamispiste. Kasaantumien muodostumiseen voidaan vaikuttaa värähtelevällä liikkeellä.

Tulevaisuudessa seuraavan sukupolven teknologioilta vaaditaan korkeampia käyttölämpötilatasoja 800–1000 °C:seen, suurempia varastointikapasiteetteja, kehittyneitä kemiallita ja mekaanista vakautta, optimoituja ympäristöjalanjälkeä ja alhaisia kustannuksia. Tällä hetkellä hiekka-akkujen kehityspotentiaali on suuremman mittakaavan laitoksissa eikä yksittäisten pienkotien energiatarpeen täyttämässä. Hiekkalämpövaraston sisältämää lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa. Hiekkalämpövarastojen kehittäminen laajemmassa mittakaavassa vaatii tutkimusta ja investointeja sekä yhteiskuntarakenteiden muuttumista.

LÄHTEET

- [1] Singh H, Saini RP, Saini JS. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2010;14(3):1059–69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.022>
- [2] T. Vuorimäki, Hiekka-akun kehittänyt yritys tähtää ulkomaille, *Aamulehti*, Tampere, 2.2.2023, s.A10.
- [3] Diago M, Iniesta AC, Soum-Glaude A, Calvet N. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology. *Applied energy*. 2018; 216:402–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.106>
- [4] Bagre, B., Muritala, I.K., Daho, T., Boukar, M., Gounkaou, Y.W., Shari, B.E., Ndiaye, A., Bere, A. and Rabani, A. Development of Sensible Heat Storage Materials Using Sand, Clay and Coal Bottom Ash. *Materials Sciences and Applications*. 2022;13(12): 603–26. <https://doi.org/10.4236/msa.2022.1312038>
- [5] Polar Night Energy. Technology. Saatavissa (viitattu 6.2.2023): <https://polarnightenergy.fi/technology>
- [6] Mechri ML, Chihi S, Mahdadi N, Beddiaf S. Study of Heat Effect on the Composition of Dunes Sand of Ouargla (Algeria) Using XRD and FTIR. *SILICON*. 2017;9(6):933–41. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9368-6>
- [7] Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy (Oxford)*. 2018; 144:341–378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- [8] Diago M, Iniesta AC, Delclos T, Shamim T, Calvet N. Characterization of Desert Sand for its Feasible use as Thermal Energy Storage Medium. *Energy Procedia*. 2015; 75:2113–8. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.333>
- [9] Sang L, Wang K, Zhang R, Wang Y, Wu Y. Effective thermal conductivity, and thermal cycling stability of solid particles for sCO₂ CSP applications. *Solar energy materials and solar cells*. 2022; 242:111764–. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111764>
- [10] Mechri ML, Chihi S, Mahdadi N, Beddiaf S. Diagnosis of the heating effect on the electrical resistivity of Ouargla (Algeria) dunes sand using XRD patterns and FTIR spectra. *Journal of African earth sciences*. 2017; 125:18–26. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.10.007>

- [11] Li G, Zheng X. Thermal energy storage system integration forms for a sustainable future. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2016; 62:736–57.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.076>
- [12] Haggag S, Ibrahim G, Katsikogiannis A, Tesh A, Kamal H, Menezes N, Nuaimi A, et al. Experimental study of solar thermal energy storage in sand system. In: 2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS). IEEE; 2017. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICETAS.2017.8277860>
- [13] Schlipf D, Schick Tanz P, Maier H, Schneider G. Using Sand and other Small Grained Materials as Heat Storage Medium in a Packed Bed HTTESS. *Energy Procedia*. 2015; 69:1029–38. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.202>
- [14] Baumann T, Zunft S. Properties of granular materials as heat transfer and storage medium in CSP application. *Solar energy materials and solar cells*. 2015; 143:38–47. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.06.037>
- [15] Alva G, Liu L, Huang X, Fang G. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2017; 68:693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- [16] Gutierrez A, Miró L, Gil A, Rodríguez-Aseguinolaza J, Barreneche C, Calvet N, et al. Advances in the valorization of waste and by-product materials as thermal energy storage (TES) materials. *Renewable & sustainable energy reviews*. 2016; 59:763–83. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.071>
- [17] Hanley, S. 2022. Sand Battery Trials Begin In Finland. *CleanTechnica* 5.7.2022. Viitattu 1.10.2023. <https://cleantechnica.com/2022/07/05/sand-battery-trials-begin-in-finland/>
- [18] Poulouse T, Kumar S, Torell G. Power storage using sand and engineered materials as an alternative for existing energy storage technologies. *Journal of energy storage*. 2022; 51:104381. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104381>
- [19] Mäki-Petäjä, P. 2022. Hiekan myyminen Saharaan ei ole enää vitsi – YK varoittaa hiekkapulasta. *MTV uutiset* 4.5.2022. Viitattu 13.8.2023. <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/hiekan-myyminen-saharaan-ei-ole-ena-vitsi-yk-varoittaa-hiekkapulasta/8418174>
- [20] P. Liesmäki, Suomessa on käynnistynyt maailman ensimmäinen hiekka-akku – ”Tämä on looginen askel kohti polttamatonta kaukolämpötuotantoa”, *Maaseudun tulevaisuus*, 7.7.2022.