

Inka Särestö

# HIEKKA-AKKUJEN SOVELTUVUUS JA SKAALAUTUVUUS SUURISSA ENERGIAJÄRJESTELMISSÄ

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Seppo Syrjälä  
Joulukuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Inka Särestö: Hiekka-akkujen soveltuvuus ja skaalautuvuus suurissa energijärjestelmissä  
The adaptation and scalability of sand batteries in large energy systems

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta  
Joulukuu 2024

Uusiutuvien energioiden yleistyessä energian varastoinnin tarve korostuu, ja uudet akkuteknologiat tulevat yhä ajankohtaisemmiksi. Epäsäännöllinen aurinko- ja tuulivoimatuotanto tulee saada jatkuvatoimiseksi, jotta uusiutuvan energian osuus ja merkitys kasvavat energiantuotannossa. Hiekka-akku lämpöakkuteknologiana tarjoaa kustannustehokkaan, skaalattavan ja ympäristöystävällisen ratkaisun pitkäaikaiseen lämpöenergian varastointiin. Työn tavoitteena on tarjota kokonaiskuva hiekka-akun teknologisesta potentiaalista ja kehitysmahdollisuuksista, edistää uusiutuvien energiaratkaisujen käyttöä osana kestävästä energiantuotannosta sekä tutkia, kuinka lämpöenergiaa varastoivia hiekka-akkuja voidaan hyödyntää ja skaalata osaksi suuria energijärjestelmiä, kuten kaukolämpötuotantoa ja teollisuuden prosesseja. Lisäksi työssä arvioidaan, onko hiekalle vaihtoehtoisia lämpöenergian varastointimateriaalia ja minkälainen vaikutus hiekka-akuilla on energiantuotannossa.

Hiekka-akun lämpöenergian varastointimateriaalina toimiva hiekka on edullista, termisesti stabiilia ja sillä on korkea lämpötilakestävyys. Nämä ominaisuudet tekevät hiekasta soveltuvan ja kestävästä materiaalin lämpöenergian varastointiin. Hiekka-akut varastoivat lämpöenergiaa eristettyyn hiekkapetiin, jota lämmitetään uusiutuvalla sähköllä kiertävän ilman avulla. Varastoitu lämpöenergia voidaan purkaa energijärjestelmän tarpeisiin, esimerkiksi kaukolämpöverkostoon tai teollisuuden prosesseihin.

Kun tarkastellaan hiekka-akkujen soveltuvuutta suurissa energijärjestelmissä, tulee huomioida hiekka-akusta purettavan lämpöenergian lämpötila-alue, joka on noin 60–400 °C. Tämän myötä hiekka-akkuja voidaan menestyksekkäästi käyttää kaukolämpötuotannossa, jossa vaaditaan melko matalia lämpötiloja. Teollisuuden prosessien laajat lämpötila-alueet voivat kuitenkin luoda materiaalitekniisiä haasteita lämpöenergian varastointiin. Nykyisillä teknologioilla hiekka-akut soveltuvat parhaiten matalan ja keskilämpötilan teollisuuden prosesseihin.

Vaihtoehtoisten materiaalien käyttö hiekka-akussa voi parantaa termofysikaalisia ominaisuuksia, mutta lämpöenergian varastointimateriaalin tulee kestää korkeita lämpötiloja, jotta se olisi hiekkaa kokonaisvaltaisesti parempi materiaali. Työssä tehdyn materiaalivertailun perusteella on olemassa termofysikaalisesti hiekkaa tehokkaampia kivilajeja, jotka kaikki eivät kuitenkaan kestä korkeita lämpötiloja. Työssä arvioidaan myös, kuinka hiekan lämmönjohtavuutta voidaan kasvattaa lisäämällä öljyä hiekan sekaan.

Hiekka-akkujen käyttö mahdollistaa uusiutuvan energian ylituotannon tehokkaan hyödyntämisen. Hiekka-akut energiantuotannossa voivat tasoittaa aurinko- ja tuulivoimatuotannon vaihteluita, vähentää sähköverkon kuormitusta sekä riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Tämä edistäisi uusiutuvan energian käyttöä energiantuotannossa, vähentäisi hiilidioksidipäästöjä ja tukisi siirtymää kohti hiilineutraalia energiantuotantoa.

Hiekka-akkuja saadaan sovellettua ja skaalattua osaksi suuria energijärjestelmiä, mutta varastoidun lämpöenergian lämpötila-alueella tulee kasvattaa teknologiakehityksellä, jotta hiekka-akkuja voidaan soveltaa kaikkiin prosessilämpötiloihin. Työn yhtenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että hiekka-akut toisivat sovellettavan ratkaisun uusiutuvan lämpöenergian varastointiin ja uusiutuvan energian epätasaiseen tuotantoon.

Avainsanat: hiekka-akku, hiekkalämpövarasto, lämpöakku, lämpöenergia, lämpöenergiavarasto, uusiutuva energia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ

Kandidaatintyössä käytetty tekoälytyökalu ja sen käyttötarkoitukset:

ChatGPT versio 4.0, OpenAI:n työkalu

Työkalua käytettiin kielenhuollon tarkistukseen virkkeen tasolla ja sisällysluettelon rakenteen ideointiin.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko kandidaatintyöni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista julkaisueettisten normien rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HIEKKA-AKUN OMINAISUUDET JA TOIMINTAPERIAATE .....	3
2.1 Hiekka lämpöenergian varastointimateriaalina .....	3
2.2 Hiekka-akun rakenne ja toiminta .....	4
3. HIEKKA-AKKU OSANA SUURIA ENERGIAJÄRJESTELMIÄ.....	6
3.1 Teknologian nykytilanne .....	6
3.2 Skaalautuvuuden mahdollisuudet .....	8
3.3 Hiekka-akku kaukolämpötuotannon lämpövarastona.....	9
3.4 Hiekka-akku teollisuuden lämpövarastona .....	11
4. VAIHTOEHTOISET MATERIAALIT LÄMPÖENERGIAVARASTOSSA .....	14
4.1 Vaihtoehtoiset kivipohjaiset materiaalit .....	14
4.2 Vaihtoehtoiset lämmönsiirtoaineet .....	16
5. HIEKKA-AKUN VAIKUTUS ENERGIAANTUOTANTOON .....	17
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	19
LÄHTEET .....	21

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

TES	Thermal Energy Storage, Lämpöenergiavarasto
TESM	Thermal Energy Storage Material, Lämpöenergian varastointimateriaali
STES	Sensible Thermal Energy Storage, Tuntuvan lämpöenergian varasto
HTF	Heat Transfer Fluid, Lämmönsiirtoneste/-aine
CSP	Concentrated Solar Power, Keskitetty aurinkovoima
SHIP	Solar Heat for Industrial Processes, Auringon lämpöenergialla toimiva teollisuuslaitos
STESM	Sensible Thermal Energy Storage Material, Tuntuvan lämpöenergian varastointimateriaali
DES	Distributed Energy Systems, Hajautetun energiantuotannon järjestelmät

$C_p$	ominaislämpökapasiteetti, J/(g·K)
$m$	massa, g
$T$	lämpötila, K tai °C
$Q$	lämpöenergia, J
$\rho$	tiheys, g/cm <sup>3</sup>
$k$	lämmönjohtavuus, W/(m·K)

# 1. JOHDANTO

Energian tuottaminen uusiutuvilla energianlähteillä kasvaa maailmalla huomattavasti tällä hetkellä sekä tulevaisuudessa, mutta uusiutuvan energian saatavuudessa on yhä ratkaistavia ongelmia. Tuotanto määräytyy vaihtelevien säätilojen mukaan, joten välillä aurinko- ja tuulivoimatuotanto voi tuottaa energiaa yli tarpeiden, jolloin on tarvetta varastoida tuotettua energiaa akkuihin myöhempää käyttöä varten. Yksi ratkaisu uusiutuvan energian pitkäaikaisvarastointiin on hiekka-akku. Hiekka-akku on verrattain uusi lämpöenergian varastointiin tarkoitettu teknologia, joka myös on edullinen, skaalattava sekä ympäristöystävällinen lämpöenergiavarasto (TES, engl. thermal energy storage) [1]. Lisäämällä lämpöä varastoivia hiekka-akkuja voitaisiin kasvattaa uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossa ja siten vähentää tarvetta päästöjä tuottaville energiantuotantomuodoille. Hiekka-akusta tulevan lämpöenergian puhtaus ympäristölle on samaa luokkaa kuin sen sähkön, jolla hiekka-akku on ladattu [2].

Hiekka-akku koostuu eristetyistä säiliöistä ja suuresta paikallaan olevasta massasta lämpöä varastoivaa hiekkaa tai hiekan kaltaista materiaalia. Lämpöä varastoiva materiaali voi olla myös muuta murskattua kivilajia tai teollisuuden sivuvirtamateriaaleja. [3] Hiekkapetiä lämmitetään kiertävällä ilmalla jopa 1 000 °C:seen asti. Kiertävä ilma on lämmitetty sähköllä, joka on tuotettu uusiutuvilla energioilla. Kiertävä lämmin ilma siirtää lämpöenergiaa hiekkaan, joka varastoi sen itseensä ja myöhemmin vapauttaa sen takaisin kiertävän ilman käyttöön. Kun lämpöenergia on siirretty hiekkapedistä takaisin ilmakiertoon, se voidaan siirtää esimerkiksi ilma-vesilämmönvaihtimeen, josta se kulkeutuu kuumana vetenä energiajärjestelmään, kuten kaukolämpöverkoston. [4]

Hiekka tai teollisuuden sivuvirtamateriaalit tarjoavat edullisen, pitkäikäisen ja luotettavan lämpöenergian varastointimateriaalin (TESM, engl. thermal energy storage material), sillä ne ovat vakaita korkeissa lämpötiloissa eivätkä aiheuta korroosiota säiliölle tai putkistolle [5]. Koska teknologia on melko uusi, eristettyyn hiekkapetisäiliöön perustuvia hiekka-akkuja on toistaiseksi vain vähän kaupallisessa käytössä. Sen sijaan hiekkaa ja sen ominaisuuksia lämpöenergian varastointimateriaalina on tutkittu paljon, sillä hiekka on osallisena monissa lämpövoimalaitoksissa [6]. Tämän työn tarkoituksena on kuitenkin selvittää, kuinka hiekka toimii päästöttömässä teknologiassa osana suuria energiajärjestelmiä.

Tämän kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten hiekka-akku toimii lämpövarastona?
  - 1.1 Miten lämpöenergiaa varastoidaan hiekkaan ja miten se saadaan käyttöön?
  - 1.2 Millainen lämpöakku hiekka-akku on?
2. Miten hiekka-akkuja voidaan soveltaa suurissa energijärjestelmissä?
3. Miten hiekka-akut voivat vaikuttaa energian saatavuuteen uusiutuvien energialähteiden yleistyessä?

Kandidaatintyön tavoitteena on selvittää hiekka-akun mahdollisuudet lämpöenergiavarastona ja tutkia sen soveltuvuutta sekä skaalautuvuutta suuren kokoluokan energijärjestelmissä, kuten kaukolämpötuotannossa ja teollisuudessa. Työssä tutkitaan myös olisiko jokin toinen kivipohjainen materiaali parempi hiekan sijasta ja voisiko lämpöenergian varastointimateriaalia ja sen lämmönsiirtokykyä parantaa lisäämällä seokseen muita aineita. Lisäksi pohditaan, millaisia vaikutuksia hiekka-akuilla olisi energiantuotantoon ja etenkin uusiutuvien energianlähteiden osuuden lisäämiseen.

Tämän kandidaatintyön luvussa 2 käsitellään hiekka-akun ominaisuuksia lämpövarastona ja sen toimintaperiaatetta. Luvussa 3 esitellään hiekka-akun käytön nykytilannetta ja tutkitaan tarkemmin hiekka-akun skaalausmahdollisuuksia suurissa energijärjestelmissä. Alaluvuissa käydään läpi hiekka-akun käyttöä osana kaukolämmöntuotantoa ja teollisuuden prosesseja. Luvussa 4 vertaillaan vaihtoehtoisia kivimateriaaleja hiekan tilalle ja kuinka vaihtoehtoisilla materiaaleilla voitaisiin parantaa hiekka-akun lämpötekniisiä ominaisuuksia. Luku 5 käsittelee hiekka-akun vaikutuksia energiantuotantoon ja energian saatavuuteen. Luvussa 6 esitellään kandidaatintyön johtopäätökset.

## 2. HIEKKA-AKUN OMINAISUUDET JA TOIMINTAPERIAATE

Tässä luvussa käsitellään hiekka-akun rakennetta ja ominaisuuksia lämpövarastona sekä tarkastellaan tarkemmin sen toimintaa ja materiaaliominaisuuksia. Hiekan materiaaliominaisuuksien ja lämpöakun toimintaperiaatteen ymmärtäminen auttavat käsittelemään hiekka-akun mahdollisuuksia suurissa energiajärjestelmissä.

### 2.1 Hiekka lämpöenergian varastointimateriaalina

Hiekka-akuissa käytettävä hiekka ja sen alkuainekoostumus voivat olla vaihtelevia, eikä hiekka-akku vaadi tietynlaista mineraalikoostumusta tai raekokoa, mikä antaa mahdollisuuden hyödyntää esimerkiksi teollisuuden ylijäämähiekkaa lämpöenergian varastointimateriaalina [7]. Hiekan alkuainekoostumuksen tarkastelemiseksi otetaan esimerkiksi dyynihiekka, jonka on mitattu koostuvan pääasiassa piistä (Si), kalsiumista (Ca), hapestasta (O), kaliumista (K), raudasta (Fe) ja mangaanista (Mn). Muita alkuaineita, joita esiintyy pienempinä määrinä hiekassa, ovat muun muassa natrium (Na), rikki (S), kromi (Cr), alumiini (Al), barium (Ba), cesium (Ce) sekä magnesium (Mg). Näistä alkuaineista muodostuu yhdisteitä, kuten piidioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), jota mineraalimuodossa kutsutaan kvartsiksi. [8] Korroosion välttämiseksi hiekka-akun hiekassa tulisi olla mahdollisimman vähän kloori- ja rikkipohjaisia yhdisteitä [3].

Hiekan lämmönjohtavuus ei ole kovinkaan korkea, kvartsilla  $0,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , mutta tämän ansiosta lämpöhäviöt hiekka-akun säiliön reunoilla pysyvät suhteellisen alhaisina. Hiekalla sen sijaan on hyvä lämmönvarastointikyky suhteessa tilavuuteen, mikä on kvartsilla noin  $1,76 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ . Vertailun vuoksi veden lämmönjohtavuus on  $0,60 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  ja lämmönvarastointikyky on  $4,19 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ , mutta hiekka tarjoaa muita etuja, kuten huomattavasti korkeamman lämpötilakestävyyden ja paineenkestävyyden. [9] Tämä tekee hiekasta vettä paremman materiaalin korkean lämpöenergian varastointiin, etenkin kun hiekalla ei ole taipumusta reagoida paineen nousuun esimerkiksi kiehumalla. Näin myös mahdollisia paineen aiheuttamia vahinkoja skaalaamisen myötä tapahtuu vähemmän.

Kun hiekka toimii lämpöenergian varastointimateriaalina, on tarkasteltava sen aineominaisuuksien muuttumista lämpötilan noustessa. Hiekalle tehtyjen lämpötilamittausten perusteella hiekka pysyy termisesti stabiilina lämpötilojen ollessa  $650\text{--}1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lämpö-



tilan noustessa korkeammaksi hiekan sisältämä kalsium saattaa muuttaa hiekan käyttäytymistä muodostamalla yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa kasaantumista tai massahäviöitä. [10] Nämä seikat tulee huomioida, kun suunnitellaan hiekka-akkujen skaalaamista korkeampia lämpötiloja vaativiin sovelluksiin, kuten tulistetun höyryn tuottamiseen.

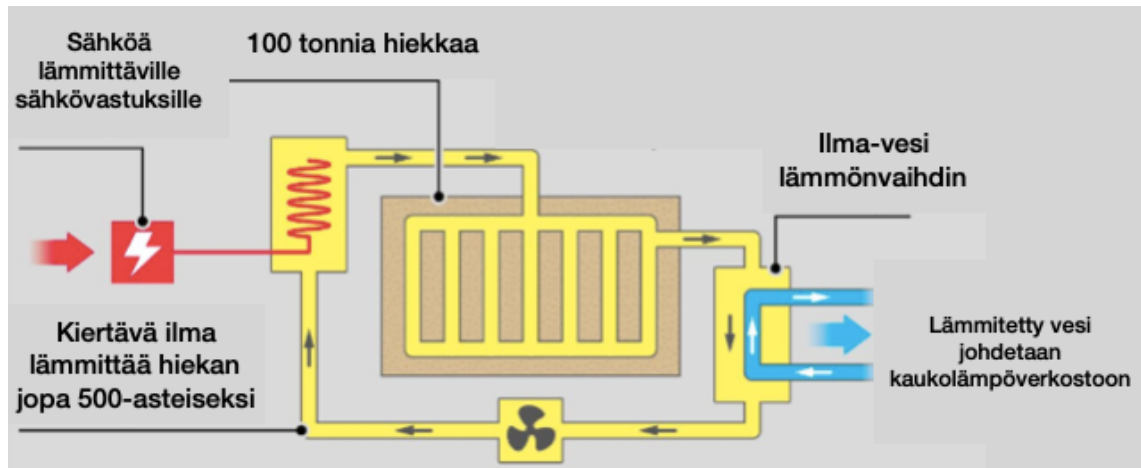
## 2.2 Hiekka-akun rakenne ja toiminta

Lämpöenergiavarastoissa (TES) lämpöenergia varastoituu tuntuvana lämpönä systeemin varastointimateriaalin ominaislämpökapasiteettiin ( $C_p$ ). Tuntuvan lämmön varastoima lämpöenergia ( $Q$ ) voidaan ilmaista yhtälönä

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T, \quad (1)$$

jossa  $m$  on massa (g) ja  $C_p$  on ominaislämpökapasiteetti ( $\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) ja  $\Delta T$  on lämpötilan nousu akun latausvaiheessa (K). Muita olemassa olevia TES-systeemeitä ovat latentti- ja termokemiallinen lämpösystemi. Latenttilämmössä hyödynnetään TESM-materiaalin faasinmuutosta ja termokemiallisessa lämmössä sorptiota kahden aineen välillä palautuvassa reaktiossa. [11] Tässä työssä tarkastellaan tuntuvan lämmön TES-systeemiä (STES, engl. sensible thermal energy storage).

Hiekka-akussa energian varastointivälineenä toimii hiekka tai hiekan kaltainen materiaali, joka sitoo sinne tulevan lämpöenergian itseensä [1]. Tämä lämpövarasto koostuu teräksisestä eristetystä siilon muotoisesta rungosta, jonka sisällä kulkevat lämmönsiirtoon tarkoitetut putket. Esimerkiksi Polar Night Energyn Kankaanpään siilo sisältää noin 100 tonnia hiekkaa paikallaan olevassa hiekkapedissä ja on rakenteeltaan kuvan 1 kaltainen. Kuvassa on esitetty hiekka-akun toiminnalle oleelliset komponentit ja prosessin ainevirrat. [12] Hiekka-akun hiekkaa lämmitetään sähköllä, joka on tuotettu tuuli- tai aurinkovoimalla. Energia siirtyy hiekkapetiin suljetun systeemin lämmönsiirtojärjestelmän kautta. Lämmönsiirtojärjestelmän putkissa kiertää ilmaa, joka on lämmitetty sähkövoimalla. Kiertävä ilma toimii TES-järjestelmän lämmönsiirtoaineena (HTF, engl. heat transfer fluid) kuljettamalla lämpöenergiaa suoran kosketuksen kautta. Hiekkapetiin varastoitua lämpöä saadaan purettua käyttöön lämmönvaihtimen avulla ja lämmitetty tuote voi olla höyryä, nestettä tai kaasua. [13]



**Kuva 1.** Hiekka-akun rakenne, perustuu lähteeseen [2]

Koska hiekka on kiinteää lämpöenergian varastointimateriaalia, lämpö pystyy siirtymään hiekkapedin ja kiertävän ilman välillä johtamalla. Hiekan lämmönjohtavuuden ollessa melko alhainen tulee hiekka-akun suunnittelussa valita tarkasti eristykseen käytettävät materiaalit, jotta systeemin lämpöhäviö pysyy mahdollisimman alhaisena. Eristävä ulko-kuori pitää hiekka-akun ytimen kuumimmassa tilassa ja lämpötilajakauma riippuu systeemin säteestä. Lämmönsiirtojärjestelmän avulla voidaan ohjata liikkuvaa ilmavirtaa, jotta lämpöakkua tyhjennettäessä voidaan priorisoida reuna-alueita hyötysuhteen pysyessä yhä hyvänä (noin 95 %). [14]

## 3. HIEKKA-AKKU OSANA SUURIA ENERGIA-JÄRJESTELMIÄ

Tässä luvussa tarkastellaan eristetyn säiliön hiekka-akkujen, joissa hiekkapeti pysyy paikallaan, nykytilannetta sekä tulevaisuuden kehitys- ja skaalausmahdollisuuksia lämpöenergiavarastona. Hiekka-akun skaalausmahdollisuuksia tarkastellaan kaukolämmön tuotannossa ja teollisuuden eri prosesseissa.

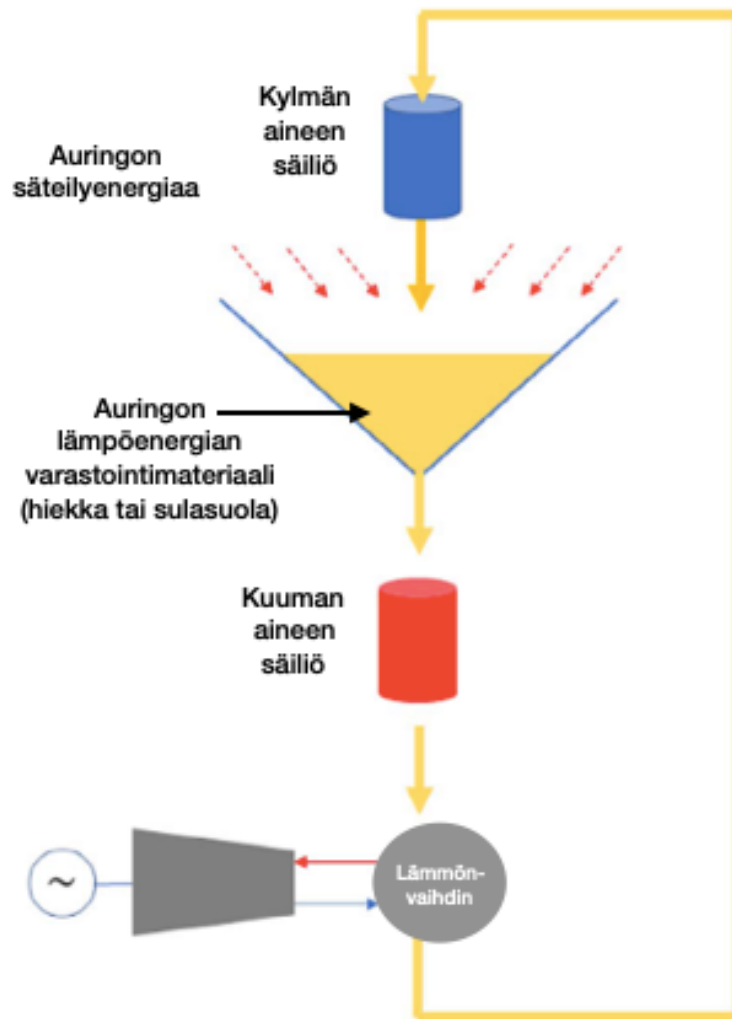
### 3.1 Teknologian nykytilanne

Koska hiekka-akku on teknologiana vielä verrattain uusi, ei kaupallisesti toimivia eristetyn hiekkapetisäiliön hiekka-akkuja ole maailmalla muualla kuin Suomessa. Tamperelaisen yhtiön perustama Polar Night Energy on hiekka-akkujen johtava yhtiö, jolla on ollut kesästä 2022 alkaen toiminnassa oleva kaupallinen hiekka-akku Kankaanpäässä. Kyseinen hiekka-akku on sijoitettu Vatajankoski Oy:n Kankaanpään voimalaitoksen yhteyteen palvelemaan osana kaukolämpöverkosta. Lämmitystehoa hiekka-akulla on 100 kW ja sen kapasiteetti, eli kokonaisvarauskyky, on 8 MWh. [2] Koska kyseessä on pilotihanke, Vatajankosken hiekka-akku ei ole skaalattu samaan kokoluokkaan kuin kaukolämpölaitokselle olisi mahdollista skaalata. Näin ollen hiekka-akun terässäiliö on pilotihankkeen kokoluokkaa, eli se on noin 4 metriä leveä ja 7 metriä korkea. [15]

Polar Night Energyllä oli vuonna 2021 testaushanke Tampereen Hiedanrannassa, ja se tuotti lämpöenergiaa kaukolämpöverkon kautta muutamalle rakennukselle. Hiedanrannan hiekka-akun avulla kerättiin tietoa sen optimoinnista ja toimivuuden varmistamisesta. Tämä hiekka-akku oli kokoluokaltaan pienempi kuin Vatajankosken akku, kapasiteetiltaan 3 MWh. [2]

Erilaisissa keskitetyn aurinkoenergian voimalaitoksissa (CSP, engl. concentrated solar power), joissa aurinkoenergiaa kohdistetaan suoraan kuumennettavaan väliaineeseen, on kokeiltu hiekkaa väliaineena. Usein CSP-laitoksissa väliaineena toimii sulasuolat. Aurinkoenergia kohdistetaan suoraan hiekkaan, joka absorboi lämpöenergiaa itseensä ja siten siirtää lämpöenergiaa systeemissä eteenpäin aina sähköksi asti. [10] Masdar Instituten SandStock-projekti Yhdistyneissä Arabiemiraattikunnissa käsittelee tiimalasin muotoisen hiekka-akun mahdollisuuksia CSP-laitoksessa, jossa hiekka toimii lämpöenergian varastointimateriaalin (TESM) lisäksi myös lämmönkerääjänä sekä lämmönsiirtomateriaalina (HTF). Tämän tyyppisessä hiekka-akussa eri lämpötiloissa oleva hiekka

kiertää systeemissä ja siirtää lämmön seuraavalle väliaineelle, joka on yleensä vettä. SandStock-projektin lämpöenergiavaraston prosessikaavio on kuvan 2 kaltainen. [16]



**Kuva 2.** Avoimen systeemin TES-järjestelmä CSP-laitoksessa, perustuu lähteeseen [10]

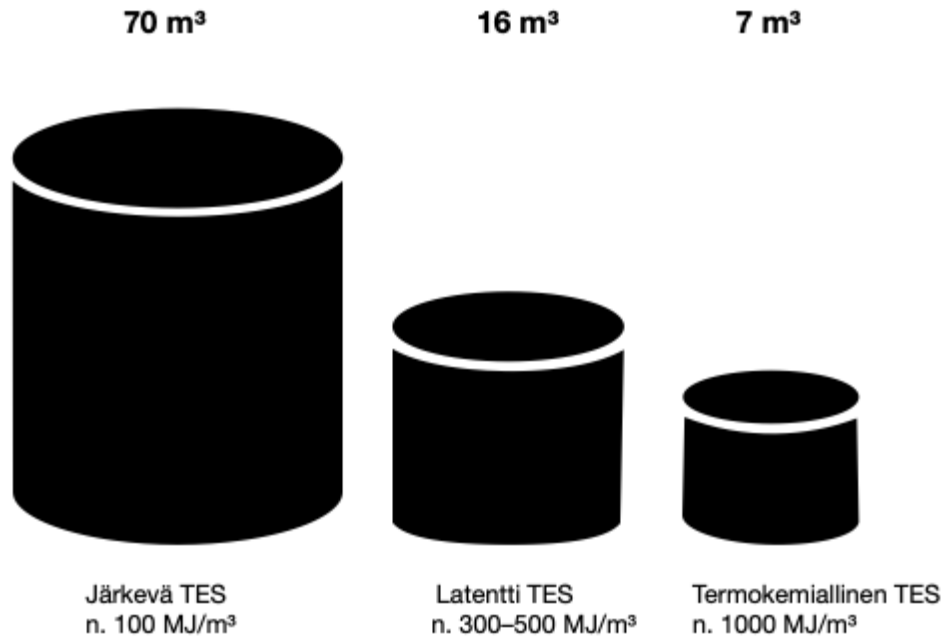
Kun auringon säteilyenergia kohdistetaan suoraan hiekkaan avoimessa systeemissä, tapahtuu prosessissa heti lämpöhäviöitä eikä kaikkea lämpöenergiaa saada varastoitua talteen. Tällaiset lyhytaikaiset hiekkalämpövarastot lisäävät vuorokauden tuotantoaikaa CSP-laitoksissa, mutta eivät varastoi lämpöä yhtä pitkäaikaisesti tai kausiluontoisesti kuin eristetyssä säiliössä oleva hiekka-akku. Avoimessa systeemissä hiekka on myös alttiimpi massahäviöille, sillä hiekan sisältämä kalsium pääsee helpommin muodostamaan kasaantumista aiheuttavia yhdisteitä suoran auringonvalon takia [10]. Näiden syiden perusteella eristetyn säiliön hiekka-akun paikallaan pysyvää hiekkapetiä on kannattavampaa lämmittää auringolla tuotetulla sähköllä kuin suoralla aurinkoenergialla.

### 3.2 Skaalautuvuuden mahdollisuudet

Hiekka-akun suuren lämpötila-alueen (600–1 000 °C) vuoksi se voidaan skaalata suuremmaksi tai pienemmäksi lämpöenergiavarastoksi (TES) ja soveltumaan eri kohteisiin. Pienemmän lämpötila-alueen hiekka-akut voivat lämmitellä yksittäisiä rakennuksia, kun taas suuremman lämpötila-alueen hiekka-akut voidaan valjastaa osaksi kaukolämpöverkostoa tai teollisuuden laitoksia.

Kiinteä materiaali, kuten hiekka, soveltuu hyvin eri lämpötiloja vaativiin lämpöenergiavarastoihin, sillä kiinteillä materiaaleilla ei ole taipumusta jäätyä tai kiehua, toisin kuin vedellä tai sulasuoloilla. Hiekka-akku voidaan skaalata soveltumaan haluttuun kapasiteettiin ja lämpötila-alueeseen. Hiekka ei myöskään vuoda säiliöstään, sillä ei ole suuria massahäviöitä, eikä hiekka muuta olomuotoaan tai painettaan, vaikka lämpötilaa nostettaisiin korkeammaksi. [17] Suuremman kapasiteetin hiekka-akku vaatii enemmän pinta-alaa ja suurempi hiekkamassa vaatii tukevamman säiliön, mutta hiekka-akun skaalaukselle ei tule esteitä materiaalin ominaisuuksien muuttumisesta.

Koska hiekka-akku on tuntuvan lämpöenergian varasto (STES), se vaatii enemmän pinta-alaa kuin latentti tai termokemiallinen TES-järjestelmä. Lämpöenergian varastointimateriaalin (TESM) energiatiheys määrittää energian vapautumisena tilavuusyksikköä kohti. Materiaalit, joilla on korkeampi energiatiheys, pystyvät varastoimaan enemmän energiaa. STES-järjestelmissä käytetyt materiaalit, kuten hiekka tai kivet, eivät pysty varastoimaan yhtä paljon energiaa kuin esimerkiksi termokemiallisessa TES-järjestelmässä, mutta STES-järjestelmät ovat kehittyneempiä suurten energijärjestelmien osalta. [5] Kuvassa 3 on esitelty suuntaa antavat hahmotelmat siitä, millainen kokoero eri TES-järjestelmillä on keskenään. Tämä tulee huomioida hiekka-akun skaalautuvuudessa ja soveltuvuudessa suuriin energijärjestelmiin, sillä niiden tulee soveltua yhteen suuren kokoluokan TES-järjestelmän kanssa. Hiekka-akku voitaisiin mahdollisesti sijoittaa myös maan alle, jolloin sen tilantarve maanpinnalla vähenisi huomattavasti.



**Kuva 3.** Tilavuuserot eri TES-järjestelmillä, joiden tulisi kattaa vuotuinen nollaenergiatilan lämmitystarve (6 480 MJ), perustuu lähteeseen [18]

Käytettävä hiekka tai hiekan kaltainen materiaali voidaan myös valita käyttökohteen mukaan, sillä hiekka-akku ei vaadi tietynlaista alkuainekoostumusta tai raekokoa [5]. Valittava TESM-materiaali voi löytyä esimerkiksi maantieteellisesti lähellä olevalta teollisuusalueelta, joka tuottaa toiminnallaan ylimääräistä kiinteää maa-ainesta tai kivimateriaalia.

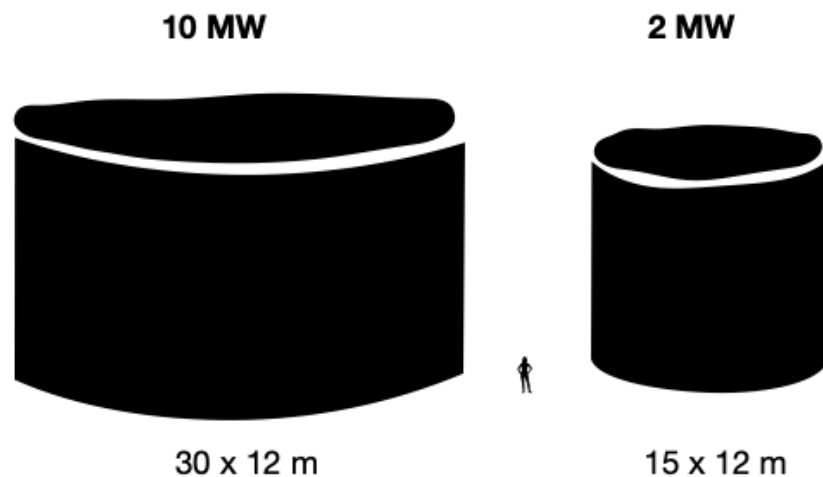
### 3.3 Hiekka-akku kaukolämpötuotannon lämpövarastona

Kaukolämpötuotanto vaihtelee vuodenaikojen mukaan, etenkin pohjoisilla alueilla. Tällöin myös lämpöenergian tarve on vaihtelevaa. Lämpöenergiaa varastoiva hiekka-akku auttaisi tasapainottamaan vaihtelevia lämmitystarpeita ja vähentäisi kaukolämpölaitoksen tarvetta useammille tuotantoyksiköille. Hiekka-akku kaukolämpölaitoksessa lisäisi tuotantotunteja ja -kapasiteettia. Kaukolämpötuotanto olisi myös luotettavampaa, sillä hiekka-akku vähentäisi kaukolämpölaitoksen prosessien monimutkaisuutta ja toimisi varatuotantona vuosihuoltojen sekä vikatilanteiden aikana. [19]

Kaukolämpöverkostot Suomessa tarvitsevat kaukolämpövesiverkostoon vettä, joka on menoputkistossa 65–115 °C. Menoputkiston lämpötila vaihtelee sään mukaan. [20] Kun hiekka-akun tuottama lämpötila-alue on 60–400 °C, voidaan hiekka-akulla täysin kattaa kaukolämpöverkoston lämpöenergiatarve.

Maailman kaukolämpötuotannosta 90 % on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla, mistä yli 48 % on hiilellä tuotettua. Suomessa kaukolämpötuotanto on melkein kokonaan (98 %) tuotettu biopolttoaineilla sekä jätteellä. Biopolttoaine mielletään uusiutuvaksi energianlähteeksi, mutta se ei ole päästötöntä, joten se tulisi korvata puhtailla uusiutuvilla energianlähteillä. [16,17] Kun kaukolämpölaitoksen pääasiallista polttamalla tuotettua energiantuotantoa voitaisiin vähentää, vähentyisi myös ilmaan vapautuvien päästöjen ja tarvittavan fossiilisen polttoaineen tai biomassan määrä. Tiheästi asutettujen alueiden kaukolämpötuotanto voitaisiin toteuttaa osittain tai kokonaan hiekka-akkujen avulla, jotta päästöt ja ilmansaasteet vähenisivät taajama-alueilla, ja perinteiset kaukolämpövoimalat voitaisiin sijoittaa syrjemmille alueille [19].

Hiekka-akku toimii tehokkaammin isoissa energijärjestelmissä kuin pienissä sovelluksissa, sillä lämpöhäviö hiekassa on verrannollinen säiliön pinta-alaan. Kun hiekka-akku skaalataan suuremmaksi ja lämpöhäviöt hiekasta pienenevät säiliön säteen kasvaessa, hiekka-akun hyötysuhde paranee. Näin ollen esimerkiksi 10 MW:n hiekka-akun hyötysuhde voisi olla jopa 5 % korkeampi kuin 2 MW:n hiekka-akulla. [13,14] Kuvassa 4 on havainnollistettu kahden eri teholuokaltaan olevan hiekka-akun kokoeroa sekä niiden suhdetta ihmiseen. Voidaan huomata, että skaalaus suuremmaksi lämpöenergiavarastoksi vaatii enemmän pinta-alaa, rakennusmateriaaleja ja suuremman säiliön. Suuri koko voi koitua rajoittavaksi tekijäksi hiekka-akun soveltuvuudessa kaukolämpölaitoksille.



**Kuva 4.** Havainnekuva hiekka-akun skaalautuvuudesta, perustuu lähteeseen [13]

Eristetyn säiliön hiekka-akun skaalaamista kaukolämpölaitokselle ei ole käytännössä vielä toteutettu, mutta Polar Night Energy on tehnyt sopimuksen Loviisan Lämmön

kanssa uudesta kaukolämpötuotannon hiekka-akusta, joka tulee olemaan suurempi kuin tällä hetkellä toiminnassa olevat kaupalliset hiekka-akut. Vaikka lämpöakun lämpöenergian varastointimateriaalina tullaan käyttämään teollisuuden ylijäämän murskattua vuolukiveä, mielletään lämpöakku kuitenkin hiekka-akuksi, sillä teknologia ja toimintaperiaate ovat aivan samanlaisia. [7] Tavalliseen hiekkaan, kvartsiin, verrattuna vuolukivellä on hieman parempi lämmönvarastointikyky;  $2,63\text{--}3,18 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  [23]. Loviisan Lämmön hiekka-akku on skaalattu kaukolämpötuotannolle sopivaan kokoluokkaan ja sen säiliö tulee olemaan 13 metriä korkea ja 15 metriä leveä. Kyseisen hiekka-akun olisi tarkoitus toimia Pornaisten kaukolämpölaitoksen pääasiallisena energiantuottajana tuottaen 1 MW verran lämpötehoa. Hiekka-akun kapasiteetin tulisi yltää 100 MWh saakka. Skaalauksen myötä hiekka-akku tulisi olemaan noin kymmenkertainen verrattuna Vatajankoski Oy:n kaukolämpövoimalan hiekka-akkuun. [7] Mikäli skaalaus on riittävän suuri, kyseisellä hiekka-akulla saataisiin tuotettua kyseisen pienen kunnan kaukolämpöenergia täysin päästöttömästi ja hyödyntäen uusiutuvia energianlähteitä. Jos hiekka-akku toimii suunnitellusti, voitaisiin samanlaisia sovelluksia asentaa osaksi muidenkin kuntien kaukolämpölaitoksia.

### 3.4 Hiekka-akku teollisuuden lämpövarastona

Uusiutuvia energianlähteitä ei käytetä teollisuudessa energianlähteinä yhtä paljon kuin fossiilisia polttoaineita, kuten hiiltä, öljyä tai maakaasua. Teollisuuden energiankulutus kattoi vuonna 2022 maailman energiankulutuksesta 37 % ja siitä 65 % oli tuotettu fossiilisilla polttoaineilla. [24] Uusiutuvia energianlähteitä, etenkin aurinkoenergiaa, hyödyntämällä saataisiin vähennettyä tarvetta fossiilisille polttoaineille teollisuuden energiantuotannossa. Yleinen ongelma kuitenkin on tarpeeksi korkeiden lämpötilojen saavuttaminen ilman varsinaisen polttoaineen polttamista. [5]

Erilaiset teollisuuden prosessit tarvitsevat eri olomuodoissa ja lämpötiloissa olevaa väliainetta toimiakseen. Riippuen siitä, mikä komponentti hiekka-akun lämpöenergian ulostuloon on kytketty, hiekka-akun lämpöenergialla voidaan tuottaa kuumaa ilmaa, vettä tai höyryä. [1]

Teollisuuden prosessit voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan niiden käyttölämpötilojen mukaan: matalan lämpötilan (alle  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), keskilämpötilan ( $150\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ja korkean lämpötilan (yli  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) prosesseihin. Korkean lämpötilan prosessit kuluttavat eniten energiaa ja vaativat suuria prosessilämpötiloja, jotka ovat hankalimpia saavuttaa uusiutuvien energianlähteiden myötä nykyisillä sovelluksilla. [5] Hiekka-akun tuottaman lämpötila-alueen ollessa  $60\text{--}400 \text{ }^\circ\text{C}$ , matalan ja keskilämpötilan prosesseihin voidaan hyödyntää



hiekkakku. Kyseisen lämpötila-alueen tulisi kattaa 36 % teollisuuden prosessien lämpöenergiatarpeesta. [25] Taulukosta 1 voidaan huomata, että joillakin teollisuuden aloilla prosessilämpötilojen vaihtelu on suurta, minkä vuoksi hiekkakku ei välttämättä sovellu kaikkiin teollisuuslaitoksen lämmitystarpeisiin, mutta sitä voitaisiin hyödyntää osaan sen prosesseista. Esimerkiksi kaivosteollisuudessa hiekkakun lämpöenergia voitaisiin ohjata esilämmitykseen ja kuivatukseen, sillä niiden lämpötila-alue on 100–400 °C [5].

**Taulukko 1.** Mahdollisia hiekkakun sovelluskohteita teollisuudessa ja niiden prosessilämpötiloja, perustuu lähteeseen [5]

Teollisuuden ala	Prosessit	Lämpötila-alue
Elintarviketeollisuus	kuivatus, pesu, pastörointi, kiehumus, sterilointi, lämmitys	30–120 °C
Paperiteollisuus	kuivatus, massanvalmistus, kemikaalien talteenotto, valkaisu	60–150 °C
Teräs- ja rautateollisuus	sulatus, jalostus, sintraus	500–1 000 °C
Tekstiiliteollisuus	valkaisu, värjäys, painatus, pesu, kuivatus	40–180 °C
Kaivosteollisuus	kuivatus, sulatus, lämmitys	100–400 °C, > 1 000 °C
Kemianteollisuus	tislaus, kiteytys, kemialliset reaktiot, lämmitys	110–300 °C, 500–1 000 °C

Maailmalla käytetään jo jonkin verran aurinkoenergiaa teollisuuden lämmitystarpeisiin, mutta hiekkakuilla saataisiin kasvatettua lämmityskapasiteettia ja voitaisiin varastoida lämpöenergiaa talteen. Vuoteen 2018 mennessä maailmalla oli 741 auringon lämpöenergialla toimivaa teollisuuslaitosta (SHIP, engl. solar heat industrial process), mutta niistä vain 300:lla oli käytössä lämpöenergiavarasto (TES). Suurin osa näistä TES-järjestelmistä varastoi lämpöenergiaa lyhytaikaisesti veteen, prosessilämpötilojen ollessa alle 100 °C. [5] Käyttämällä hiekkaa tai muuta kivipohjaista materiaalia energian varastointiin, saataisiin tuotettua korkeampia lämpötiloja teollisuuden käyttöön. Useat SHIP-laitokset käyttävät aurinkoenergian suoraan prosessiin, eivätkä lataa energiaa talteen

myöhempää käyttöä varten [5]. SHIP-laitosten periaate ei toimi kaikkialla maailmassa, sillä niiden toiminta edellyttää varmoja useita aurinkoisia päiviä ympäri vuoden.

Teollisuudelle tärkeitä suoritusmittareita ovat muun muassa tuotannon energiankulutuksen vähentäminen ja korkealaatuisen energian käyttäminen, minkä vuoksi uusiutuvan energian integroiminen osaksi energiantuotantoa on tullut entistä ajankohtaisemmaksi [5]. Lisäämällä hiekka-akun tai -akkuja teollisuuden prosessiin saadaan uusiutuvat energianlähteet osaksi prosessia. Hiekka lämpöenergian varastointimateriaalina (TESM) on myös edullisempi valinta kuin esimerkiksi sulasuolat ja kestävämpi sekä pitkäikäisempi kuin vesi. Hiekka-akun käyttöaika voi olla jopa 50 vuotta [2]. Koska korkean prosessilämmön varastointi veteen voi aiheuttaa paineistettua höyryä TES-järjestelmässä, on kiinteää TESH-materiaalia sisältävä TES-järjestelmä vakaampi vaihtoehto teollisuuden prosesseihin [26].

## 4. VAIHTOEHTOISET MATERIAALIT LÄMPÖ-ENERGIAVARASTOSSA

Tässä luvussa tehdään materiaalitarkastelua kivipohjaisten lämpöenergian varastointimateriaalien (TESM) ja lämmönsiirtoaineiden tai -nesteiden (HTF) suhteen. Materiaalitarkastelun myötä pohditaan, voiko hiekka-akun termofysikaalisia ominaisuuksia parantaa vaihtamalla jotakin käytetyistä materiaaleista.

### 4.1 Vaihtoehtoiset kivipohjaiset materiaalit

Kiinteät luonnosta löytyvät materiaalit ovat usein edullisempia vaihtoehtoja lämpöenergian varastointiin kuin esimerkiksi sulasuolat. Luonnonkiven tai hiekan käyttäminen tuntuvan lämpöenergian varastointimateriaalina (STEMS) voi vähentää lämpöenergiavaraston (TES) kustannuksia yhä säilyttäen hyvän hyötysuhteen. Materiaalinvalinnan yleinen ongelma on kuitenkin löytää sellainen luonnonmateriaali, jonka lämmönvarastointikyky ja lämmönjohtavuus ovat tarpeeksi korkeat. [27] Tavallisella hiekalla on yleisesti ottaen hyvä lämmönvarastointikyky, mutta sen lämmönjohtavuus pitäisi olla korkeampi, jotta lämpöhäviöt olisivat pienemmät ja hiekka-akusta saataisiin purettua enemmän lämpöenergiaa.

Kun valitaan lämpöenergian varastointimateriaalia tuntuvan lämpöenergian lämpöakkuun (STES), tulee kiinnittää huomiota materiaalin termofysikaalisiin ominaisuuksiin. STEMS-materiaalivaihtoehtoja on tutkittu laajasti ja niiden ominaisuuksista on tehty johtopäätöksiä, jotka vaikuttavat sopivan materiaalin valintaan. Yleiseksi tavoitearvoksi lämmönjohtavuudelle on määritetty vähintään  $1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , joka on enemmän kuin hiekan lämmönjohtavuus. [28] Vaikka tavoitearvo on korkeampi kuin hiekalla, hiekka voi toimia oikealla säiliön eristyksellä TES-järjestelmässä tavoitteidensa mukaisesti ja tehokkaasti. Jotta voidaan tehdä tehokkaita, mutta kooltaan pienempiä tuntuvan lämmön lämpöakkuja, tulee lämmönvarastointikykyyn olla vähintään  $2 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  [29]. Taulukossa 2 on esitetty termofysikaalisia ominaisuuksia eri kivimateriaaleille, jotka voivat toimia STEMS-materiaaleina hiekka-akussa. Taulukon 2 arvoista voidaan huomata, että on sellaisia kivimateriaaleja, jotka arvoiltaan voivat toimia tavallista hiekkaa paremmin.

**Taulukko 2.** Kivipohjaisten materiaalien termofysikaalisia ominaisuuksia 20 °C:ssa

Kivimateriaali	Tiheys $\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Ominaislämpökapasiteetti $C_p$ , J/(g·K)	Lämmönjohtavuus $k$ , W/(m·K)	Lämmönvarastointikyky $\rho \cdot C_p$ , MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Huokoisuus %	Lähde
Hiekka/kvartsi	2,2	0,8	0,2	1,76	38,0–40,0	[9,30]
Kvartsiitti	2,2–2,8	0,8–0,9	2,0	1,75–2,50	0,22–22,1	[11]
Graniitti	2,6–2,7	0,6–0,95	2,6–3,1	1,56–2,52	1,02–2,87	[11,23]
Kalkkikivi	2,3–2,8	0,68–0,91	2,0–3,0	1,58–2,51	-	[23]
Tiili	1,8	0,84	0,5	1,51	-	[31]
Vuolukivi	2,7–3,0	0,98–1,07	2,5	2,63–3,18	-	[23]
Gabbro	2,9–3,0	0,6–1,0	1,5–2,6	1,72–3,03	-	[23]
Basaltti	2,3–3,0	0,7–1,23	1,2–2,3	1,6–3,71	0,65–0,81	[11,23]

Suomessa luonnonkivien ominaisuuksista on tutkittu muun muassa niiden ominaislämpökapasiteettia, lämmönjohtavuutta ja tiheyttä. Näiden tutkimusten myötä ollaan havaittu, että Suomessa basalttikiven lämmönvarastointikyky voi olla jopa  $4,2 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ , joka on korkeampi kuin taulukon 2 yleistason mittauksissa saatu arvo. [26] Tästä voidaan päätellä, että luonnonmateriaaleissa voi olla laajasti maantieteellistä vaihtelevuutta ja TESM-materiaalin valintaan vaikuttaa siten oleellisesti materiaalin maantieteellinen sijainti, etenkin jos se hankitaan paikallisesti.

Jos verrataan taulukon materiaalien arvoja aiemmin mainittuihin yleisiin tavoitearvoihin, voidaan huomata, että esimerkiksi vuolukivellä on paremmat lämmönjohtavuus- ja lämmönvarastointiarvot kuin hiekalla. Lämmönvarastointikyky on miltei kaksinkertainen hiekkaan verrattuna ja lämmönjohtavuus on yli 12-kertainen. Vuolukiven käytön lämpöenergian varastointimateriaalina tulisi vähentää lämpöhäviöitä ja tehostaa lämmönsiirtoa TESM-materiaalista lämpökassa kiertävään ilmavirtaan. Murskatun vuolukiven käyttöä hiekan tilalla ollaan toteuttamassa Pornaisten rakenteilla (2024) olevassa hiekka-akussa [7]. Kyseisessä lämpökassa käytetään teollisuuden ylijäämästä muodostuvaa vuolukiveä, joten TESM-materiaalin hinta ei ole samaa luokkaa kuin louhitun vuolukiven.

Paikallinen saatavuus, alhainen hinta, tiheys, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus ovat ratkaisevia tekijöitä TESM-materiaalin valinnassa, mutta materiaalin lämpötilakestävyys on yhä huomioitava. Kun hiekka pysyy termisesti stabiilina jopa 1 000 °C:seen asti, graniitti, basaltti ja kvartsiitti alkavat hajota ja menettävät massaansa 350–400 °C:n jälkeen. Huono lämpötilakestävyys johtuu usein kivilajien kemiallisesta koostumuksesta ja mineraalien kemiallisista reaktioista lämpötilan nousuun. [10,11] Tästä syystä edellä mainitut materiaalit eivät sovellu korkean lämpötilan TES-järjestelmään.

## 4.2 Vaihtoehtoiset lämmönsiirtoaineet

Eristetyn säiliön hiekka-akussa lämmönsiirtoaineena (HTF) toimii kiertävä ilma, mutta monissa lämpöenergiavarastoissa (TES) HTF on nestemäisessä muodossa eli lämmönsiirtonesteenä. Useissa keskitetyn aurinkovoiman CSP-laitoksissa HTF-nesteenä käytetään lämpö-öljyä, joka tehostaa lämmönsiirtoa TESM-materiaalista purkuvaiheessa. [11] Öljyn käyttö lämmönsiirtoaineena tai tehosteena hiekan seassa voi tehdä hiekka-akusta energiatehokkaamman suuremmissa korkean lämpötilan sovelluksissa.

Kun tarkastellaan lämpö-öljyn käyttöä kivipohjaisissa materiaaleissa, tulee ottaa myös huomioon materiaalin huokoisuus, jotta öljy ei imeydy varastointimateriaaliin [11]. Taulukossa 2 on esitetty joidenkin kivipohjaisten materiaalien huokoisuusprosentteja. Jos öljyä käytetään TES-järjestelmässä HTF-nesteenä, kivimateriaalin huokoisuuden tulee olla mahdollisimman alhainen. [11]. Tällaiseen järjestelmään sopivat paremmin tiheärakenteiset kivilajit, kuten basaltti. Basaltti omaa kuitenkin huonon lämpötilakestävyuden, mikä rajoittaa sen tuottaman lämpöenergian ulostulolämpötilaa.

Kuten taulukosta 2 nähdään, hiekalla on näistä materiaaleista suurin huokoisuus eikä siten öljyn käyttö HTF-nesteenä ole kannattavaa. Sen sijaan öljyä voidaan käyttää seosaineena hiekkapedissä, johon se imeytyy hyvin. Öljyn lisäämistä hiekkaan on testattu ja kyseisten testien perusteella hiekan ja öljyn seoksen on huomattu varastoivan lämpöenergiaa tavallista hiekkaa paremmin. Myös ulos saatavan lämpöenergian lämpötilan on havaittu olevan korkeampi. Öljyn suuremman ominaislämpökapasiteetin,  $2,05 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , ansiosta hiekkaseoksen lämmönvarastointikyky kasvaa noin  $0,01 \text{ MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$  ja latausvaiheen hyötysuhteen mitattiin kasvavan jopa 9,8 % verrattuna pelkkään hiekkaan. Vaikka öljyllä seostettu hiekka näytti tehdyissä testeissä olevan termofysikaalisesti vahvempi kuin tavallinen hiekka, se toimi termisesti stabiilina vain 316 °C:seen. [30]

## 5. HIEKKA-AKUN VAIKUTUS ENERGIANTUOTANTOON

Hiekka-akkujen ja muiden lämpöenergiavarastojen (TES) lisääminen osaksi suuria energijärjestelmiä vähentää tarvetta ja riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä kasvattaa uusiutuvien energiantuotantomuotojen osuutta energiantuotannossa. Koska aurinko- ja tuulivoima ovat luonteeltaan ajoittaisia ja tuotannon vaihtelevuus on suurta, hiekka-akun lisääminen energijärjestelmään vähentää hukkaan menevän energian osuutta sekä tarjoaa energiaa myös tuulettomina ja pilvisinä päivinä sekä yöaikaan.

Lämpöakkujen myötä myös energiantuotantarve laskee, sillä mahdollista energian ylituotantoa voidaan hyödyntää lämpöakun lataamiseen. Ne auttavat myös tasapainottamaan energiantuotannon kysyntää ja tarjontaa energiantuotannon puolella. Kun uusiutuvien energioiden käyttö yleistyy energiantuotannossa, yleistyvät myös hajautetun energian energiavarastot (DES, engl. distributed energy storage). DES-järjestelmien avulla voidaan joustavammin tasapainottaa sähköverkon kuormaa ja ohjata energiaa verkossa tarkemmin. Kun lisätään DES- ja TES-järjestelmiä älykkääseen sähköverkkojärjestelmään (engl. Smart Grid), voidaan automatisoida ja optimoida uusiutuvan energiantuotannon hyödyt osaksi verkkoa. [5] Hiekka-akun lataaminen tasaa uusiutuvan sähköenergian ylituotantoa ja siten myös sähköverkon kuormaa. Näin saadaan hyötykäytettyä ylimääräinen sähkö varastoimalla se hiekka-akkuun, josta se voidaan purkaa lämpöenergiana ulos. Lämpöenergian varastointi vähentää myös tarvetta tuottaa energiaa huippukulutusaikoina, mikä parantaa sähköverkon vakautta ja energian saatavuutta.

Lämpöenergiavarastot, kuten hiekka-akut, ovat muihin akkuteknologioihin verrattuna turvallisempia ja kestävämpiä, sillä niiden ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset ovat pienempiä kuin esimerkiksi litium-, lyijy- ja vetyakuilla. Ympäristövaikutuksista esimerkiksi TES-järjestelmien materiaalien kierrätys on edistysellisempää eikä materiaalien hankinta tuota yhtä merkittävästi ihmisoikeuskonflikteja. Hiekan käyttö lämpöakussa vähentää riippuvuutta yhä harvinaisemmiksi tulevista metalleista, joita perinteiset akut vaativat. [5,32] Etenkin lämpöenergian varastointimateriaalin (TESM) valinta vaikuttaa näihin asioihin, sillä mitä epäjalostetumpaa tai kierrätetympää materiaalia voidaan käyttää lämpöakussa, sitä vähemmän päästöjä ja ympäristövaikutuksia TES-systeemin valmistamisesta aiheutuu. Hiekka TESH-materiaalina on erittäin hyvä valinta, sillä sitä ei tarvitse louhia kaivoksesta tai erikseen valmistaa. Näin ollen hiekka-akun käyttö edistää ympäristöystävällisempien ratkaisujen yleistymistä energiantuotannossa.

Vaikka uudet lämpöenergiavarastot aiheuttavat lisää investointeja, ne kuitenkin auttavat vähentämään fossiilisten polttoaineiden hankintakustannuksia, päästöjä sekä tarvetta useammalle lämpöenergian tuotantoyksikölle lämpövoimalaitoksilla [19]. Lämpöenergian varastointijärjestelmien, erityisesti tuntuvan lämpöenergian varastointijärjestelmien (STES), investointikustannukset ovat alhaisemmat varastointikapasiteettiä kohti verrattuna sähköisiin akkuteknologioihin. Kun sähköisten akkuteknologioiden varastointikapasiteetti maksaa yli 100 000 e/MWh, lämpöenergiavarastot kustantavat vain noin 2 000 e/MWh. [33] Investointiin vaikuttaa myös se, rakennetaanko uuden hiekka-akun lisäksi myös keskitetyn aurinkovoiman CSP-laitos tai tuulivoimalaitos vai tuleeko uusiutuva energia valmiita sähkön siirtoverkkoja pitkin lämpöakulle.

Hiekka-akun yhdistäminen aurinko- tai tuulivoimaan vähentäisi hiilidioksidipäästöjä tehtyjen mallinnusten mukaan yli 770 gCO<sub>2</sub>eq/kWh verrattuna polttopohjaisiin tuotantoteknologioihin. Hiekkapohjainen korkean lämpötilan kausilämmön varastointi mahdollistaisi vuoden 2030 mallinnusten mukaan 170 MtCO<sub>2</sub>e/vuosi vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Tähän arvoon sisältyvät myös tuotannon ja käytön aiheuttamat päästöt 30 vuoden käyttöajalta, mutta ne ovat vain 2 gCO<sub>2</sub>eq/kWh. [34] Hiekka-akku vähentäisi energiantuotannon hiilidioksidipäästöjä merkittävästi ja auttaisi energiantuotannon hiilineutraaliustavoitteen saavuttamisessa.

Hiekka-akut voivat auttaa yhdistämään sähkö-, lämpö- ja teollisuussektorit yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi, mikä parantaa koko energiajärjestelmän tehokkuutta. Kaukolämpöverkostojen ja tuotantolaitosten pitkät välimatkat ja verkon tiedonkulun aikaviiveet voivat aiheuttaa lämpöhäviöitä ja hukkaan menevää lämpöenergiaa. Sijoittamalla uusiutuvan sähköenergian tuotantolaitoksia ja hiekka-akkuja osaksi kaukolämpötuotantoa, voidaan minimoida hukkaan menevän lämpöenergian määrä. Lämpöenergiavarastot toimivat puskurina kysynnän ja tarjonnan välillä parantaen kaukolämpöjärjestelmien joustavuutta ja suorituskykyä sekä mahdollistamalla uusiutuvan energian tehokkaamman hyödyntämisen kaukolämpöverkoissa. [19] Kun voidaan yhdistää uusiutuvan sähköenergian tuotantoa ja hiekka-akkuja osaksi teollisuuden prosesseja ja kaukolämpölaitoksia, voidaan hyödyntää sähkö- ja lämpöenergian varastointia monipuolisesti. Energian varastointi sulkee näiden sektoreiden välisen kuilun etäisyyden ja ajan suhteen. Yhdeltä sektorilta ylijäämäenergia voidaan myös muuntaa muihin energiamuotoihin ennen kuin se käytetään toisella sektorilla. [5] Näin ollen myös energian saatavuus paranee.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kandidaatintyössä tutkittiin, kuinka lämpöenergiaa varastoivia hiekka-akkuja voidaan soveltaa ja skaalata osaksi suuria energiajärjestelmiä, eli kaukolämpötuotantoa ja teollisuuden prosesseja. Työssä tarkasteltiin myös vaihtoehtoisten materiaalien käyttöä lämpöenergian varastoinnissa ja lämmönsiirrossa. Tavoitteena työssä oli selvittää, kuinka hiekka-akkujen käyttö suurissa energiajärjestelmissä vaikuttaa energiantuotantoon ja siten myös energian saatavuuteen.

Hiekka-akku teknologiana toimii lämpöenergiavarastona, jota lämmitetään uusiutuvilla energioilla tuotetulla sähköllä. Lämpöenergia varastoidaan hiekkapetiin ja hiekan ominaislämpökapasiteettiin, josta se voidaan purkaa lämpöenergiana energiajärjestelmien, kuten kaukolämpöverkoston tai teollisuuden prosessien käyttöön. Hiekka-akun pääkomponentteja ovat hyvin eristetty terässäiliö, johon hiekkapeti on sijoitettu, lämmönsiirtoon tarkoitetut putket sekä lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimen avulla varastoitu lämpöenergia voidaan valjastaa kuumaksi vedeksi, ilmaksi tai höyryksi.

Hiekka lämpöenergian varastointimateriaalina on edullista, pitkäikäistä, stabiilia ja se kestää korkeita lämpötiloja, mikä tekee siitä soveltuvan materiaalin lämpöenergian varastointiin. Hiekka-akkuja voidaan lisätä osaksi kaukolämpöverkostoja ja erilaisia teollisuuden prosesseja. Hiekka-akuilla voidaan korvata tarvetta fossiilisille polttoaineille ja useammille lämpöenergian tuotantoyksiköille. Koska kaukolämpötuotanto tarvitsee melko matalia lämpötiloja, hiekka-akkuja pystytään soveltamaan ja skaalaamaan kattavasti osaksi tuotantolaitoksia. Teollisuuden prosessien laajat lämpötila-alueet, yli 400 °C:n prosessit, voivat aiheuttaa materiaalitekniisiä haasteita hiekka-akkujen skaalauksessa. Nykyisillä teknologioilla ja lämpötila-alueilla hiekka-akut soveltuvat matalan ja keskilämpötilan teollisuusprosesseihin. Esimerkiksi tulistetun höyryn tuottaminen hiekka-akun lämpöenergialla edellyttäisi merkittäviä parannuksia lämmönvarastointikapasiteettiin ja hiekan lämmönjohtavuuteen.

Vaihtoehtoisten materiaalien käyttö hiekka-akussa voi parantaa termofysikaalisia ominaisuuksia, mutta lämpöenergian varastointimateriaalin tulee kestää korkeita lämpötiloja, jotta se olisi hiekkaa kokonaisvaltaisesti parempi materiaali. Materiaalivertailu osoittaa, että esimerkiksi vuolukivi on hiekkaa parempi kivipohjainen vaihtoehto, ja sen hyödyntäminen hiekka-akussa voisi merkittävästi parantaa järjestelmän skaalautuvuutta. Lämpö-öljyn lisääminen hiekkaan parantaa lämmönjohtavuutta hiekka-akussa, mutta käytettävän öljyn tulisi kestää korkeita lämpötiloja, jotta se toimisi stabiilisti.



Lämpöenergian pitkäaikainen varastointi hiekkaan mahdollistaisi aurinko- ja tuulivoiman tuottaman energian jatkuvatoimisen käytön ja saatavuuden energiantuotannossa. Aurinko- ja tuulivoiman ylituotannon lataaminen hiekka-akkuihin vähentäisi sähköverkon kuormaa ja tasaisi kuormien ajoa. Kun uusiutuvaa energiaa saadaan varastoitua hiekka-akkuihin, tarve fossiilisille polttoaineille ja polttoon perustuvalla energiantuotannolla vähenee. Tämä puolestaan auttaa vähentämään hiilidioksidipäästöjen määrää ja helpottaa hiilineutraaliuden tavoittelemisessa. Jos uusiutuvan sähköenergian tuotantolaitoksia ja hiekka-akkuja sijoitetaan kaukolämpöverkoston ja teollisuusprosessien yhteyteen, voidaan hyödyntää sähkö- ja lämpöenergian varastointia monipuolisesti ja parantaa energijärjestelmän joustavuutta, saatavuutta sekä suorituskykyä. Hiekka-akkujen käyttö voi merkittävästi edistää uusiutuvien energianlähteiden integrointia osaksi energiantuotantoa ja vähentää fossiilisten polttoaineiden tarvetta.

## LÄHTEET

- [1] Vyas AM, Kushwah GS. Sand Battery: An Innovative Solution for Renewable Energy Storage (A Review). 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM), 2023, p. 1–5. <https://doi.org/10.1109/RESEM57584.2023.10236319>.
- [2] Technology. Polar Night Energy. Saatavissa (viitattu 19.9.2024): <https://polarnight-energy.fi/technology>
- [3] Eronen T, Ylönen M. A system and a method for storing and transferring heat. FI20195181A1, 2019.
- [4] Shahul A, Pavithra.L, Eldhose KV, Thasni S, Jennez D, Resmara S. Sand Battery Technology: A Promising Solution for Renewable Energy Storage 2023. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.8012403>.
- [5] Koçak B, Fernandez AI, Paksoy H. Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. *Solar Energy* 2020;209:135–69. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.081>.
- [6] Lalitha Priya R, Subi S, Vaishnu B, Vijaya Chandrakala KRM. Study on Characterization of River Sand as Heat Storage Medium. *Indian Journal of Science and Technology* 2016;9. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i30/99010>.
- [7] News. Polar Night Energy 2024. Saatavissa (viitattu 20.9.2024): <https://polarnight-energy.fi/news>
- [8] 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;9:933–41. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9368-6>.
- [9] Seppänen R, Mannila L, Kervinen M, Parkkila I, Konttinen P, Karkela L, et al. MAOL Taulukot. vol. 2013. 1.-4. Keuruu: Otava; 2013.
- [10] 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>.
- [11] Alva G, Lin Y, Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 2018;144:341–78. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.
- [12] Carter N. ENVIRONMENT: Sand battery green heating solution infographic. *Graphic News*. 2022. <https://www.graphicnews.com/en/pages/42921/environment-sand-battery-green-heating-solution>

- [13] What is a sand battery? — Polar Night Energy. Saatavissa (viitattu 17.9.2024): <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>
- [14] Sand Battery's Efficiency Explained – Polar Night Energy's 'Sand Battery' Has Efficiency Up To 95 Per Cent. Polar Night Energy 2022. Saatavissa (viitattu 24.9.2024): <https://polarnightenergy.fi/news/2022/11/24/sand-batterys-efficiency-explained-polar-night-energys-sand-battery-has-efficiency-up-to-95-per-cent>
- [15] Hiekka-akku. Vatajankoski. 2024. Saatavissa (viitattu 26.9.2024): <https://www.vatajankoski.fi/innovaatiot/hiekka-akku/>
- [16] Iniesta AC, Diago M, Delclos T, Falcoz Q, Shamim T, Calvet N. Gravity-fed Combined Solar Receiver/Storage System Using Sand Particles as Heat Collector, Heat Transfer and Thermal Energy Storage Media. *Energy Procedia* 2015;69:802–11. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.089>.
- [17] Hasnain SM. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* 1998;39:1127–38. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9).
- [18] Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;18:327–49. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>.
- [19] Guelpa E, Verda V. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. *Applied Energy* 2019;252:113474. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113474>.
- [20] Kaukolämpöverkot. Energiatietoa/energiaverkot/kaukolampoverkot/ <https://energia.fi/energiatietoa/energiaverkot/kaukolampoverkot/>
- [21] District Heating - Energy System - IEA. Saatavissa (viitattu 25.10.2024): <https://www.iea.org/energy-system/buildings/district-heating>
- [22] Finland - Countries & Regions. IEA. Saatavissa (viitattu 25.10.2024): <https://www.iea.org/countries/finland>
- [23] Kakoko LD, Jande YAC, Kivevele T. Experimental Investigation of Soapstone and Granite Rocks as Energy-Storage Materials for Concentrated Solar Power Generation and Solar Drying Technology. *ACS Omega* 2023;8:18554–65. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00314>.
- [24] Industry - Energy System. IEA. Saatavissa (viitattu 25.10.2024): <https://www.iea.org/energy-system/industry>
- [25] Process Industries. Polar Night Energy. 2024. Saatavissa (viitattu 24.10.2024): <https://polarnightenergy.com/process-industries/>

- [26] Seyitini L, Belgasim B, Enweremadu CC. Solid state sensible heat storage technology for industrial applications – A review. *Journal of Energy Storage* 2023;62:106919. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106919>.
- [27] El Alami K, Asbik M, Agalit H. Identification of natural rocks as storage materials in thermal energy storage (TES) system of concentrated solar power (CSP) plants – A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2020;217:110599. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110599>.
- [28] Fernandez AI, Martínez M, Segarra M, Martorell I, Cabeza LF. Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2010;94:1723–9. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.035>.
- [29] Bagre B, Muritala IK, Daho T, Boukar M, Gounkaou YW, Shari BE, et al. Development of Sensible Heat Storage Materials Using Sand, Clay and Coal Bottom Ash. *MSA* 2022;13:603–26. <https://doi.org/10.4236/msa.2022.1312038>.
- [30] Xu B, Han J, Kumar A, Li P, Yang Y. Thermal storage using sand saturated by thermal-conductive fluid and comparison with the use of concrete. *Journal of Energy Storage* 2017;13:85–95. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.06.010>.
- [31] Sadeghi G. Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges. *Energy Storage Materials* 2022;46:192–222. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.01.017>.
- [32] Florin N, Dominish E. *Sustainability Evaluation of Energy Storage Technologies*. Sydney: ITS-The Institute for Sustainable Futures; 2017.
- [33] Lund H, Østergaard PA, Connolly D, Ridjan I, Mathiesen BV, Hvelplund F, et al. Energy Storage and Smart Energy Systems. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 2016;11:3–14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>.
- [34] Mission Innovation's Net-Zero Compatible Innovations Initiative (NCI). *Avoided Emissions Framework (AEF) Level 2 version 0.8 assessment*. Polar Night Energy Oy. Sand-Based Heat Storage.pdf. 2020.