

Emilia Niittyviita

TUNNETUT JA TUTKITUT LÄMMÖN VARASTOINTIMATERIAALIT

Osa 1. Nykytilan selvitys lämpöakkuihin soveltuvista materiaaleista

**RESINA-hanke
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kesäkuu 2026**



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Elinvoimakeskus

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 MATALANLÄMPÖTILAN LÄMMÖNVARASTOINTI LÄMPÖAKUISSA – KIRJALLISUUSKATSAUS	3
3 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	13
LÄHTEET	16

1 JOHDANTO

Lämmön varastoinnin avulla voidaan tulevaisuudessa päästä lämpöenergian tuotannossa hiilineutraaliksi tai -vapaaksi, ja siksi erityisen kiinnostavia sovelluksia ovat erilaiset uusiutuvan lämmön sekä hukkalämmön varastointi mahdollisuudet. Tällaisen energian varastointiin voidaan hyödyntää lämpövarastoa (thermal energy storage, TES). (Bespalko, Miranda & Halychyi 2018, Islam & Morimoto 2018, Zhang, Guo, Zhu, Zhang, Yan, Liu & Hao 2024, Tawalbeh, Khan, Al-Othman, Almomani & Ajith 2023.) Lämpövarasto, eli lämpöakku, on siis systeemi, johon voidaan varastoida lämpöenergiaa, ja joka koostuu tyypillisesti suljetusta ympäristöstä, kuten eristetystä tankista, tämän ympäristön sisältämästä lämmönvarastointi materiaalista ja varaston lataukseen ja purkuun tarvittavista lämmönsiirtovälineistä (lämmönsiirtoaineet, lämmönvaihtimet) (Bespalko ym. 2018, Georgousis, Diriken, Speetjens & Rindt 2025). Lämpövarastoja on erilaisia ja niitä voidaan kategorisoida kolmella eri tavalla: lämmönvarastoitavan tai -ajan perusteella sekä varastoitavan lämmön lämpötilan mukaan (Bespalko ym. 2018, Islam & Morimoto 2018, Tawalbeh ym. 2023).

Kirjallisuudessa esitetään usein kolme lämmönvarastointi tapaa, joita lämpövarastojen kanssa käytetään. Nämä ovat sensible heat storage (SHS, encapsulated thermal battery tai sensible thermal energy storage (STES)), eli materiaalin luonnollisen lämmönvarastointikyvyn hyödyntäminen; latenttilämpövarasto (latent heat storage LHS), eli faasimuutosten hyödyntäminen lämmön varastoinnissa; ja kemiallinen lämpövarasto (chemical heat storage, thermochemical heat storage), eli kemiallisen muutoksen hyödyntäminen lämmön varastoinnissa. (Islam & Morimoto 2018, Tawalbeh ym. 2023)

Varastoitavan lämmön lämpötilan mukaan kategorisoidessa, tarkka lämpötila-alue sekä kategorioiden määrä vaihtelee lähteittäin, mutta varastot voidaan jakaa esimerkiksi kahteenategoriaan: matalalämpötila – varastot, joissa lämpötila on alle 200 °C ; sekä korkealämpötila – varastot, joissa lämpötila on yli 200 °C. (Bespalko ym. 2018, Tawalbeh ym. 2023) Matalalämpötila energiavarastoja voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön, hukkalämmön, aurinkolämmön tai biokaasulaitoksista tuotettavan ja muodostuvan hukkalämmön varastointiin ja hyödyntämiseen. (Bespalko ym. 2018) Korkealämpötila varastot soveltuvat kaupalliseen toimintaan, kuten esimerkiksi energiantuotannon sekä teollisuuden lämmöntarpeiden kattamiseen. (Tawalbeh ym. 2023)

Varastotyyppin ja lämpötilan lisäksi voidaan lämmönvarastointia kategorisoida varastointiajan perusteella. Näin lämpövarastot voidaan jakaa nopeisiin ja hitaisiin, lämmön liikkua systeemiin ja systeemistä ulos nopeasti tuntien tai päivien mittaisen varastoinnin jälkeen, tai hitaasti kuukausien kuluttua. Tällä tavoin erilaisilla lämpövarastoilla voidaan kohtauttaa kausittaisen tuotanto ja energia tarve, niin lyhyellä, kuin pitkällä aikavälillä. (Bespalko ym. 2018, Tawalbeh ym. 2023)

Oli lämpövarasto minkälainen tahansa, vaati se aina lämmönvarastointiin sopivan materiaalin. Yleisesti lämmönvarastointimateriaaleille oleellisia ominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti (Jacob, Sergeev & Müller 2022, Majó, Calderón, Svobodova-Sedlackova, Segarra, Fernández & Barreneche 2025, Han, Song, Tan, Ji, Song & Xu 2025). Varastoivan materiaalissa lämmönjohtavuus eli lambda-arvo (λ -arvo) on kiinteästi yhteydessä akun käytettävyyteen, koska lämmönjohtuminen materiaalissa, eli lämmön siirtyminen lämmönvaihtimien ja lämmönvarastointimateriaalin välillä mahdollistavat varaston toiminnan. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025.) Koska lämpövaraston massa, ja siten käytetyn materiaalin massa vaikuttaa akun ominaisuuksiin, myös materiaalin tiheys on oleellinen suure,

varsinkin jos akun koolle on rajoitteita käyttökohteessa. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025.)

Ideaalilla lämmönvarastointimateriaalilla on korkea lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti sekä tiheys. Tällöin varastoon pystytään lataamaan paljon energiaa pieneen tilaan ja joka voidaan purkaa ja ladata nopeasti. Käyttöominaisuuksiltaan ideaali lämpövarasto on harvoin mahdollinen eikä välttämättä tuolloinkaan kustannustehokas. Etsimällä käyttökohteeseen sopivat materiaalit optimoidaan itse lämpövarastolle oleellisia ominaisuuksia: kapasiteettia, tehoa, latausyksin kestoa ja tehokkuutta, eli kuinka paljon energiaa voidaan varastoida, kuinka nopeasti varastoitu energia voidaan hyödyntää ja millaisia häviöitä prosessissa muodostuu (Tawalbeh ym. 2023).

Tämä selvitys on tehty osana RESINA-hankkeen toteutusta (rahoittaja Pohjois-Suomen elinvoimakeskus). Lämpöakku hankkeen kontekstissa: Lämpöakku, jossa akkumateriaalina käytetään kiinteää materiaalia tai veden ja kiinteänmateriaalin seosta, ja jossa lämmönsiirtoon käytetään vettä. Lämpö siirtyy lämmönvaihtimen kautta akkuun ja akusta takaisin käyttöön. Käytettävät materiaalit ovat ei neitseellistä alkuperää. Akuissa käytettävä lämpötila liikkuu välillä arviolta 30–99°C, siten että lämmittävän veden lähde voisi olla esimerkiksi ylimäärälämpöä lämpölaitokselta tai aurinkokeräimillä kerättyä lämpöä.

Hankkeen lähtökohtana on ollut ajatus hyödyntää vaikeasti hyödynnettäviä jättemateriaaleja hukka- ja uusiutuvan lämmön varastointiin. Kaatopaikoille ja muuhun läjitykseen päätyy potentiaalisesti runsaasti erilaisia muuhun käyttöön kelpaamattomia maa-, kivi-, keramiikka- ja/tai vastaavia aineksia ja materiaaleja, joita voitaisiin hyödyntää lämpövarastojen tai lämpöakkujen rakennusmateriaaleina, niin akkujen sisällä kuin eristemateriaalina. Tutkittavaksi on alustavasti esitetty esimerkiksi seuraavia materiaaleja:

- Akkumateriaali
 - Pilaantunut maa-aines
 - Kiviainekset (sivukivet, teollisuuden mineraalijäte)
 - Betonijäte ja rakennusjäte (sis. kontaminoituneet jakeet, mm. asbestia sisältävät)
 - Keramiikkajäte (sis. tiilijäte)
 - Pohjatuhka (lämmöntuotanto)
 - Kuonat (polttolaitokset, metalliteollisuus)
 - Puhallushiekka
 - Muu pääosin hajoamaton jättemateriaali
- Eristysmateriaali
 - Lentotuhka
 - Perliitti
 - Hiontapöly tai muu kevyt teollisuuden hienojakoinen materiaali
 - Eristysmateriaalijäte (lasivilla, mineraalivilla jne.)
 - Leca-sora
 - Muu hajoamattomat kantavat materiaalit

Tässä selvityksessä tarkastellaan kirjallisuuden avulla mitä tietoa esitetyn tyyppisistä materiaaleista on lämmönvarastointi sovelluksissa saatavilla ja tutkittu jo aikaisemmin käytännön laboratorio tutkimuksen tueksi ja taustaksi.

2 MATALANLÄMPÖTILAN LÄMMÖNVARASTOINTI LÄMPÖAKUISSA – KIRJALLISUUSKATSAUS

Lämpöakuissa lämpöenergia varastoidaan akun sisältämään akkumateriaaliin. Akkumateriaalin täytyy siten täyttää mm. tiettyjä fysikaalisia ja mekaanisia ominaisuuksia, sekä taloudellisia reunaehtoja. Kirjallisuudessa on esitetty runsaasti erilaisia lämpöakkuihinvaikuttavia ominaisuuksia, jotka jaetaan usein fysikaalisiin, termisiin, mekaanisiin, kemiallisiin sekä ekonomisiin tekijöihin (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025). Tyypilliset ominaisuudet sekä niiden tavoitearvoja on esitetty tiivistetysti taulukossa 1. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025.) Akkumateriaalin termiset ominaisuudet määrittävät sen kyvyn ja kestävyys lämmönsäilömiseen, mekaaniset ominaisuudet materiaalin rakenteellisen kestävyys ja kemikaaliset ominaisuudet materiaalin stabiilisuudesta, yhteensopivuudesta muiden materiaalien kanssa sekä ympäristöystävällisyydestä (esim. myrkyllisyys) (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025). Ekonomiset näkökulmat vaikuttavat energiavaraston kannattavuuteen, kuten takaisimaksuaikaan (Jacob ym. 2022, Han ym. 2025).

Taulukko 1. Lämmönvarastointiin käytettävän akkumateriaalin halutut ominaisuudet. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025)

Toivottu ominaisuus	Tarkennus	Tekijät, tarpeet, vaikutukset	Keskeinen suure	Haluttu arvo
Terminen stabiilisuus	Faasimuutosten lämpötila	Sulamispiste tarpeeksi korkea, jotta sintraantuminen voidaan välttää käytössä	Sulamispiste	yli 1500 °C
Terminen ja mekaaninen kestävyys	Rakenteen pystävyys	Termisen shokin kestävyys, materiaalin pitkäkestoisuus (rasituksen kesto)	Lämpölaajenemiskerroin	Stabiili 1000 °C asti
			Venymä	korkea
			Kovuus	korkea
			Murtumalujuus	korkea
			Myöntölujuus	korkea
	Lämmön varastointikyky	Lämmönsiirtokyky	Lämmönjohtavuus (λ -arvo)	korkea
		Materiaalin energia tiheys	Ominaislämpökapasiteetti	korkea
Fysikaaliset ominaisuudet	Käytetyt kappaleet	Lämmönsiirtyminen	Pallomaisuus (sphericity)	0,9
			Pyöristyneisyysaste (roundness)	0,9
			Kitka	
		Energiatiheys	Tiheys	korkea
		Tyhjän tilan määrä tankissa, partikkelien yhteen kertyminen (sintrautuminen, agglomeroituminen), lämmön	Partikkelikokojakauma	0,5–10 mm

		siirtyminen (kontakti lämmönsiirtonesteen kanssa)		
Kemiallisesti stabiili	Käytetty lämmönvarastointimateriaali	Inertti / ei-reaktiivinen lämpötila-alueella		
		Yhteensopiva käytettyjen muiden materiaalien kanssa		
Kemiallisesti harmiton		Ei myrkyllinen tai haitallinen ihmisille tai ympäristölle		
		Ei palava		

Lämmönvarastointiin käytettävän materiaalin tulee olla fyysisesti, mekaanisesti ja kemiallisesti stabiili käytetyissä lämpötiloissa ja olosuhteissa (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025). Materiaalin yhteensopivuus lämpöakussa käytettyjen rakennusmateriaalien kanssa on niin ikään oleellista (Jacob ym. 2022). Lisäksi lämpötilan aiheuttamat muutokset materiaalissa eivät saa aiheuttaa vahinkoa akkurakenteelle tai akun toimivuudelle. Käytännössä tämä tarkoittaa, että materiaalissa ei fyysisesti tapahdu käytetyllä lämpötila-alueella faasimuutoksia eikä merkittävää lämpölaajenemista. (Majó ym. 2025, Han ym. 2025.) Faasimuutosten tulee olla riittävän korkeassa lämpötilassa tapahtuvia käyttölämpötilaan nähden, jotta käytön myötä vältetään myös materiaalin sintraantumiselta. (Majó ym. 2025.) Materiaalin lämpölaajeneminen voi aiheuttaa merkittävää stressiä akun rakenteille, potentiaalisesti lyhentäen akun käyttöikää ja siten vähentää varaston taloudellisuutta.

Mekaaninen stabiilisuus on tärkeää, jotta materiaalin rakenne pysyy muuttumattomana, säilyttäen hyvän kontaktin lämmönvaihtimiin, sekä kantavuutensa, kun kyseessä on kiinteä materiaali. Mekaanisesti materiaalin tulee olla kovaa ja venyvää sekä omata korkea murto-, myöntö- sekä puristuslujuus, jotta se pystyy kannattelemaan itseään eikä kulu ja hajoa liian nopeasti lämpötilan muutosten aiheuttaman stressin myötä. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025.) Kemiallisesti materiaalin taas tulee olla yhteensopiva rakennusmateriaalien kanssa, sekä käytetyllä lämpötila alueella stabiili. Turvallisen käytön ja ympäristön näkökulmasta tulee materiaalin olla palamatonta, eikä sen sovi olla myrkyllistä. (Jacob ym. 2022.) Stabiilit materiaalit mahdollistavat lämpövaraston pitkän käyttöiän.

Stabiilisuuden ja yhteensopivuuden lisäksi lämmön varastointi materiaaleilla on toivottuja ja vaadittuja ominaisuuksia, joilla voidaan vaikuttaa lämpöakun energiatiheuteen ja tehokkuuteen, ja siten tarvittaessa myös kokoon. Käytettyjen materiaalien tulee termisiltä ominaisuuksiltaan olla sellaisia, että ne omaavat korkean ominaislämpökapasiteetin – eli että materiaali pystyy sitomaan itseensä mahdollisimman paljon lämpöenergiaa – sekä korkean lämmönjohtavuuden – eli materiaalin kyvyn vastaanottaa ja siirtää lämpöä mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025). Materiaalia tarkasteltaessa on tärkeää myös huomioda, että materiaalin lämmönjohtavuus muuttuu lämpötilan mukaan (Jacob ym. 2022). Siten esimerkiksi korkeassa lämpötilassa toimivat materiaalit eivät välttämättä toimi riittävän hyvin matalanlämpötilan sovelluksissa tai päinvastoin, riippuen materiaalin ominaisuuksista. Materiaalin toimivuus ja käyttäytyminen suunnitellulla käyttölämpötila-alueella onkin siksi oleellista.

Fysikaalisia toivottuja ominaisuuksia ovat tiheys, sopiva partikkelikoko ja koon jakauma sekä pyöreämuoto. Nämä ominaisuuden vaikuttavat akun energiatihyyteen, siten että mitä tiheämpi ja tiiviimmin pakattava materiaali on, sen parempi. (Jacob ym. 2022, Majó ym. 2025, Han ym. 2025.) Pakkautumisessa tulee erityisesti ottaa huomioon partikkelikoko jakauma sekä partikkelien muoto, joka vaikuttaa mm. tyhjän tilan täyttöön, eli kuinka paljon tyhjää tilaa partikkelien ympärille muodostuu, sekä kontaktiin eri rakenteiden välillä (partikkelien keskinäinen sekä partikkelien kontakti lämmönvaihtimiin) (Majó ym. 2025). Mekaaninen hajoaminen ja sen aiheuttama partikkelikokojakauma ja partikkelien muodon muutos muuttavat lämpövaraston olosuhteita ja siten sen tehokkuutta ja kykyä toimia tarkoitetun mukaisesti. Lämmönsiirto nestettä käytettäessä partikkelien koko, muoto ja pakkautuminen ovat niin ikään oleellisia, jotta neste pääsee kulkemaan materiaalipatjan läpi, ja siksi myös nesteen ja hyödynnetyn materiaalin välinen kitka on yksi huomioitava ominaisuus (Georgousis, Diriken, Speetjens & Rindt 2025).

Lisäksi on oleellista tarkastella akkujen taloudellisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Käytettävien materiaalien tulee olla halpoja sekä yleisesti suurissa määrin saatavilla olevia. (Jacob ym. 2022, Han ym. 2025) Kustannustehokkuuteen voidaan toki vaikuttaa valitsemalla fyysisiltä ominaisuuksiltaan sopivimpia materiaaleja.

Materiaalivaatimuksien lisäksi varastoa rakennettaessa voi olla itse lämpövaraston rakennetta rajoittavia tekijöitä. Esimerkiksi tilan käyttö, vaikuttaa siihen miten tiheää materiaalin täytyy olla ja saada pakattua. Jos tila ei ole rajoittava tekijä voidaan tasapainotella materiaalikustannusten ja materiaalin termisten ominaisuuksien kanssa siten että vähemmän tiheitä tai pienemmän ominaislämpökapasiteetin materiaaleja voidaan hyödyntää niiden ollessa saatavilla kohtuulliseen hintaan, energian säilönnän hinnan näin pysyessä matalana ja siten lämpövaraston käytön kannattavana. Varastoitavan lämmön lämpötila alue vaikuttaa siihen millaista materiaalia voi ja kannattaa hyödyntää.

Taulukossa 2–5 on esitetty kirjallisuudesta löytyviä materiaaleja sekä niiden ominaisuuksia. Materiaalit on jaettu ei kategorioihin materiaalityypin ja -lähteiden perusteella. Edellä mainittujen ominaisuuksien lisäksi akkumateriaaleille on esitetty laskennallinen tilavuusominaislämpökapasiteetti, eli kuinka paljon materiaali voi varastoida lämpöä tilavuusyksikköä kohden, toimintalämpötila alue tai maksimi toiminta lämpötila sekä hinta, mikäli tietoja on saatavilla. Taulukoista voidaan nähdä, että kierrätysmateriaaleja sekä luonnonmateriaaleja (kivi, hiekka) käyttäessä koostumus ja rakenne voivat vaihdella merkittävästi eri materiaalivirtojen välillä. Tyypillisiä jo käytössä olevia materiaaleja ovat Diaz-Piloneta ym. (2025) mukaan kivimateriaalit, hiekka, betoni, rauta, erilaiset terästeollisuuden kuonat, lentotuhka, suolasulat sekä vesi. (Diaz-Piloneta ym. 2025.)

Taulukossa esitetyistä materiaaleista esiin nousevat vesi ominaislämpökapasiteetin myötä, käyttölämpötila alue on kuitenkin rajallinen, mutta soveltuu matalan lämpötilan sovelluksiin ja integroitavaksi esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. Korkeaa lämpötilaa kestävät esimerkiksi tiilet ja kuonamateriaalit, joiden ominaislämpökapasiteetti jää alle veden, mutta joiden lämmönjohtavuus on kohtuullinen. Korkeimpia lämmönjohtavuuksia omaavat metallit ja grafiitti. Näillä materiaaleilla on kuitenkin edellisiä matalampi ominaislämpökapasiteetti, ja oletettavasti myös potentiaalisia muita käyttökohteita lämmönvarastoinnin lisäksi. Tarkasteltaessa tiheysominaislämpökapasiteettia, joka suurissa lämpöakuissa, on potentiaalisesti oleellisempi ominaisuus kuin ominaislämpökapasiteetti, voidaan nähdä, että veden rinnalle nousee useita maa-, tiili-, jäte- ja metallimateriaaleja, joilla on käyttöpotentiaalia myös yli 100 °C asteen sovelluksissa. Taulukon lopussa on esitetty myös kirjallisuudessa esitettyjä valmistettuja akkumateriaaleja, jotka niin ikään nousevat veden tiheysominaislämpökapasiteetin tasolle.

Taulukko 2. Akkumateriaaleina käytettäviä ja tutkittuja kivi- ja maa-aineksia, sekä niiden akkukäytön kannalta oleellisia ominaisuuksia.

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominaislämpökapasiteetti (kJ/m³K) laskettu	Lähde
Maa-ainekset							
Maa-aines (kuiva)			0,25–0,3	796	1260–1300	1003–1035	1
Maa-aines (märkä)			2,51	2093	1700	3558	1
Hiekka	200–600	0,02	0,25–5,2	652–1200	1500–2700	978–3240	1, 8, 10, 18
Savi			0,7–1,5	860–880	1500–2300	1290–2024	1
Kivimateriaalit							
Sora/pikkukivi			0,85–3,4	900–2450	1350–2753	1215–6745	5, 14
Kivimurska			2,5	1060	1581	1676	5
Kivi	200–600	0,05–0,09	2,50–3,50	1000–1060	1500–2800	1500–2968	18
Metamorffiset kivilajit	...550		1,5–5,2	600–1500	2200–3300	1320–4950	5, 8
Sedimentti kivet			1,7–7	650–1500	1500–2800	975–4200	5
Basaltti		0,03	2,08–2,1	755–1028	2600–2800	1963–2878	10, 14
Basalttilasi			1,6	1274	2660	3389	5
Diabaasi			2,2–3,0	870–1599	2700–3000	2349–4797	5, 10
Dioriitti			2,5	1000	2800–3000	2800–3000	10
Gabro			1,5–2,6	600–1000	2900–3000	1740–3000	10
Gneissi			2,93	900	2732,4	2459	5
Grafiitti			88,578–200	401–1900	1700–2300	682–4370	1, 5, 10
Graniitti		<0,05	1,73–3,98	600–950	2600–2760	1560–2622	1,1
Granodioriitti			2,6	650	2700	1755	10
Hematiittimalmi			0,31	618	2171	1342	5
Hiekkakivi		<0,05	1,7–2,9	694–950	2200–2600	1527–2470	1, 10
Hornfels			1,5	820	2700	2214	10
Kalkkikivi		<0,05	1,26–3,0	683–921	2300–2800	1570–2579	1, 5, 10
Kvartsiitti		0,03–0,04	2,9–5,7	623–860	2500–2670	1558–2296	5, 10, 14
Magmakivet	...550		1,2–3	600–1200	2300–3200	1380–3840	5, 8
Magnetiitti	200–600	0,135	3,1	800–900	4962	3970–4466	10, 14, 18

Taulukko 2 jatkuu

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominais- lämpökapasiteetti (kJ/m³K) laskettu	Lähde
Marmori			2,07–3,2	800–883	2600–2840	2080–2508	1, 10
Posliinikivi (Porcellanite)			3,5	380	2420	920	14
Posliinikivi, lämpökäsittely (Porcellanite)			5,5	980	2420	2372	14
Ryoliitti			1,6–2,3	785	2300–2600	1806–2041	10
Steatiitti (vuolukivi)			2,5	980–1068	2700–3000	2646–3204	10
Kaivosteollisuus							
Kaoliinipitoinen liete	500–1800	0,05–0,1	0,5–2,5	700–900	2850	1995–2565	11
Karbonaattivaahdotusjäte	2000–2500	0,0001–0,001	2–5	970–1130	3340–3440	3240–3887	11
Rautahilkka (gossan)	700–1500	0,0001–0,001	1–3	980–1030	3720–3780	3646–3893	11
Rikastusjäte, rauta	25–590	-	0,10–0,25	780–990	2948	2299–2919	18
Sintrattu malmi			2,5	920	1605	1477	5
Sivukivi, kivihiili	800–1000	0,01–0,03	7,45–11,5	790–1127	2490–3250	1967–3663	11, 13

Lähteet: 1=Bespalko ym. 2018, 2=Islam ym. 2018, 3=Koçak ym. 2021b, 4=Zhang ym. 2024, 5=Tawalbeh ym. 2023, 6=Jacob ym. 2022, 7=Zineb ym. 2022, 8=Segovia ym. 2025, 9=Yang ym. 2024, 10=Georgousis ym. 2025, 11=Majó ym. 2025, 12=Agalit ym. 2020, 13=Han ym. 2025, 14=El Kouihen ym. 2023, 15=Lai ym. 2022, 16=Calderón-Vásquez ym. 2021, 17=Koçak ym. 2021a, 18=Diaz-Piloneta ym. 2025.

Taulukko 3. Akkumateriaaleina käytettäviä ja tutkittuja metallimateriaaleja ja metalliteollisuuden sivuvirtoja, sekä niiden akkukäytön kannalta oleellisia ominaisuuksia.

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominais-lämpökapasiteetti (kJ/m³K) las-kettu	Lähde
Alumiini		1,5–2,0	204	896	2700	2419	10
Kupari	...160		0,56–38,5	383–837	2400–8954	919–7494	2,5
Teräs	20–800	5	40–50	502–650	7800	3916–5070	2, 5, 10, 18
Valurauta	25–800	0,3–1	29,3–73,0	465–837	7200–7900	3348–6612	1, 2, 4, 10, 18
Kuona, kuparin jalostus	...800–1200	0,12–0,15	0,8–2,2	571–1500	2785–4350	1590–6525	5, 6, 8, 16, 17
Kuona, teräksen valmistus, useista lähteistä	1000–1400	0,1–0,3	0,5–1	800–1100	3350–3390	2680–3729	11
Kuona, teräksen jalostus, emäshappimellotus	...320	0	1,8–2,2	750–960	3807–3844	2855–3690	6, 17
Kuona, teräksen jalostus, induktiouuni	...1000			463–964	2583–3413	1196–3290	6, 8, 10, 12, 17
Kuona, teräksen jalostus, masuuniuuni			1–1,5	1061	2800–2833,6	2971–2995	6, 13, 17
Kuona, teräksen jalostus, senkkauuni	1000–1200	0,1–0,5	0,5–1,5	500–1000	3700–3720	1850–3720	11
Kuona, teräksen jalostus, valokaariuuni	200–1200	0,08–0,3	0,53–1,84	710–1070	3350–4260	2379–4558	4, 6, 10, 11, 16, 18
Jäte, teräksen jalostus, valssi-/pajahilse	500–550	0,05–0,15	0,5–1,5	700–1000	5170–5740	3619–5740	11
Jäte, teräksen jalostus/kierrätys, pöly (dust)	1000–1400	0,02–0,05	0,5–1,5	700–1200	3620–4930	2534–5916	11

Lähteet: 1=Bespalko ym. 2018, 2=Islam ym. 2018, 3=Koçak ym. 2021b, 4=Zhang ym. 2024, 5=Tawalbeh ym. 2023, 6=Jacob ym. 2022, 7=Zineb ym. 2022, 8=Segovia ym. 2025, 9=Yang ym. 2024, 10=Georgousis ym. 2025, 11=Majó ym. 2025, 12=Agalit ym. 2020, 13=Han ym. 2025, 14=El Kouihen ym. 2023, 15=Lai ym. 2022, 16=Calderón-Vásquez ym. 2021, 17=Koçak ym. 2021a, 18=Diaz-Piloneta ym. 2025.

Taulukko 4. Akkumateriaaleina käytettäviä ja tutkittuja teollisuuden sivuvirtoja ja jättemateriaaleja, sekä niiden akkukäytön kannalta oleellisia ominaisuuksia.

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominais- lämpökapasiteetti (kJ/m3K) laskettu	Lähde
AlferRock, alumiiniteollisuus, bauksiitti prosessointi		0,07*		791–1037	3630–3930	2871–4075	6
Alkaliaktivoitu materiaali, (lentotuhka 50 m-% ja metalliteollisuuden kuona m-50%)			–	700	1950	1365	5
Alumiinisementti, kuparin jalostus		0,2*	1,4	630–923	2947	1857–2720	6
Asbestijäte, käsitelty, sis. Cofalit	200–1600	0,008–1,20	1,4–2,1	800–1034	3000–3160	2400–3267	6, 7, 10, 11, 17, 18
Fosfaatti rakeet/pelletit			0,236	770	2380	1833	5
Kalsiumkloridi	...160		-	670	2510	1682	2
Kidevedeton anstrakaniitti, epämetalli teollisuus		0,25*		1525		-	6
Kuona, CFB-kattilan pohjakuona				1122	2440,7	2738	13
Kuona, hiilen poltto				1000	2761–3044	2761–3044	15
Kuonamateriaali + MgO + tulenkestävä savi	...1000		0,677–1,137	1290	2300–2440	2967–3148	4
Lentotuhka	200–1400	0,02–0,04	1,16–2,1	700–1700	1268–2962	888–5035	6, 7, 10, 11, 17, 18
Lentotuhka (hiilenpoltto) + kuona (terästeollisuus) (50/50 m-%)	...800–1000	0,07*		700–1270	882–2592	617–3292	5, 6

Taulukko 4 jatkuu

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominaislämpökapasiteetti (kJ/m³K) laskettu	Lähde
Lentotuhka + kattilakuona, hiilien poltto (50/50 m-%)	...1000			1220–1280	2022–2054	2467–2629	6
Li4(OH)3Br (kiinteä)			0,47	1680	–	-	5
Nylon kuitu betonissa			1,16	630	2440	1537	6
Rakennusjäte, jauhe**	...700	0,001		1457	2855	4160	3
Sivuvirta, ilmeniitin prosessointi, pulveri (WrutF)		0,008	0,8	749–1085	4154	3111–4507	17
Sivuvirta, kaliumkarbonaatin valmistus	...800	0,007	0,33–4	640–850	1384–2050	886–1743	6, 17
Yhdyskuntajäte, poltettu, erilaisia jakeita	1000–1400	0,001–1,5*	1,16–1,59	150–1180	1600–2962	240–3495	6

Lähteet: 1=Bespalko ym. 2018, 2=Islam ym. 2018, 3=Koçak ym. 2021b, 4=Zhang ym. 2024, 5=Tawalbeh ym. 2023, 6=Jacob ym. 2022, 7=Zineb ym. 2022, 8=Segovia ym. 2025, 9=Yang ym. 2024, 10=Georgousis ym. 2025, 11=Majó ym. 2025, 12=Agalit ym. 2020, 13=Han ym. 2025, 14=El Kouihen ym. 2023, 15=Lai ym. 2022, 16=Calderón-Vásquez ym. 2021, 17=Koçak ym. 2021a, 18=Díaz-Piloneta ym. 2025.

Taulukko 5. Akkumateriaaleina käytettäviä ja tutkittuja nesteitä, suolasulia ja muita erityismateriaaleja sekä -jätteitä, sekä niiden akkukäytön kannalta oleellisia ominaisuuksia.

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominaislämpökapasiteetti (kJ/m3K) laskettu	Lähde
Nesteet ja sulat							
Auringonkukkaöljy			0,161	2969	753,1	2236	5
Bentsoehappo			0,139	1800	1074,9	1935	5
Butanoli	...118		0,167	2400	809	1942	2
Etanoli	...78		0,171	2400	790	1896	2
Lyijy-vismutti, eutektinen seos			13,77	145	10139	1470	5
Lämmönsiirtoöljy, kaupallisia			0,49–0,161	2835–2847	686–697	1943–1984	5
Moottoriöljy	...160		-	1880	888	1669	2
Natriumkloridi	250–800	0,15	0,51–7	800–900	2160	1728–1944	5, 18
Suolasulat ja seokset	200–600...670	0,625–,0700	0,15–2,0	940–2520	1640–2600	1542–6552	8, 18
Syltherm 800		0,265	0,064	2112	690	1457	14
Vesi	0–100	0,0015	0,58–0,602	2400–4182	998,2	2396–4174	1, 2, 18
Rakennusmateriaalit ja -jätteet							
Betoni	20...800	0,005...0,08	0,9–2,37	850–1130	2200–2800	1870–3164	2, 4, 5, 8, 10, 11, 18
Muovilevy (plastic board)	-		0,5	837	1050	879	2
Purkujäte	...700	0,001–1	0,1–1,2	1287–1457	2730–2900	3514–4225	5, 6, 7, 8, 10, 17
Puu	-		0,16	2093	800	1674	2
PVC-levy	-		0,16	1004	1379	1385	2
Sementti			0,29	1550	1506	2334	5

Taulukko 5 jatkuu

Materiaali	Toimintalämpötila (°C)	Hinta (€/kg, *= USD/kg)	Lambda-arvo (W/mK)	Ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)	Tiheys (kg/m³)	Tilavuusominais- lämpökapasiteetti (kJ/m³K) laskettu	Lähde
Keraamiset materiaalit ja tiilet						0	
Alumina	25–1000	0,315–1,6	1,2–30	800–1180	2200–3960	1344	5, 10, 18
Bauksiitti		0,9	3,98	1076	3005	1760–4673	10
Jäte, tulitiilet	1000–1200	0,05–0,15	1–2,5	700–1000	2970–3280	3233	11
Keraaminen vaahto			20,7	800	2327	2079–3280	5
Silika		0,2–1,0	5	950	2400	1862	10
Tiili	1600–2000	0,001–0,03	0,35–1,59	700–1070	1640–3200	2280	10, 11
Tiili, kalkkiahiekkä			0,7	837–879	1800	1148–3424	1
Tiili, magnesiumoksidi	...1200		1,5–5,1	1130–1150	3000	1507–1582	1, 4, 8
Tiili, piioksidi	...700		1–1,5	1000	1800–1820	3390–3450	1,4,5

Lähteet: 1=Bespalko ym. 2018, 2=Islam ym. 2018, 3=Koçak ym. 2021b, 4=Zhang ym. 2024, 5=Tawalbeh ym. 2023, 6=Jacob ym. 2022, 7=Zineb ym. 2022, 8=Segovia ym. 2025, 9=Yang ym. 2024, 10=Georgousis ym. 2025, 11=Majó ym. 2025, 12=Agalit ym. 2020, 13=Han ym. 2025, 14=El Kouihen ym. 2023, 15=Lai ym. 2022, 16=Calderón-Vásquez ym. 2021, 17=Koçak ym. 2021a, 18=Díaz-Piloneta ym. 2025.

3 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Kirjallisuudesta löytyy laaja kirjo materiaaleja, joita on tutkittu niiden lämmön varastointi ominaisuuksien suhteen. Useita materiaaleista hyödynnetään jo nykyisellään. Kirjallisuudessa esitetyt arvot eri materiaalien tarvitsemista ominaisuuksista antavat suuntaviivaa siitä millaisia vaatimuksia ja kriteerejä potentiaalisille uusille materiaalin lähteille tulee asettaa. Näiden tietojen perusteella voidaan sanoa ehdotettujen tutkittavien materiaalien tulisi olla soveltuvia käyttöön, ja hyödynnettävyys liittyy todennäköisimmin taloudellisiin tekijöihin ja materiaalin saatavuuteen.

Koska matalan lämpötilan sovelluksissa veden hyödyntäminen on tehokas tapa säilöä lämpöä, on veden ja kiinteään materiaaliin yhdistäminen potentiaalisesti toimiva järjestelmä. Tällaisessa ratkaisussa vesi lisää materiaaliseoksen tiheyttä, ominaislämpökapasiteettia sekä kontaktipinta-alaa materiaalin ja lämmönvaihtimen välillä helpottaen lämmön johtumista materiaalissa. Vesi voi tällaisessa sovelluksessa saman aikaisesti lämmönsiirtoneste sekä lämmönvarastointi materiaali. Näiden materiaaliseosten käyttöä selvitetään RESINA- hankkeen erilaisia sivuvirtoja ja kierrätysmateriaaleja hyödyntäen. Testattavia materiaaleja ja niiden soveltuvuutta lämmönvarastointiin esitellään raporttisarjan toisessa osassa.

LÄHTEET

Agalit, H., Zari, N. & Maaroufi, M. 2020. Suitability of industrial wastes for application as high temperature thermal energy storage (TES) materials in solar tower power plants – A comprehensive review. *Solar Energy*, 208, 2020, 1151–1165. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.055>. Viitattu: 22.1.2026.

Barbhuiya, S., Das, B. B. & Adak, D. 2025. Energy storage potential of cementitious materials: Advances, challenges and future Directions. *Energy & Buildings*, 327, 115063. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115063>. Viitattu: 11.9.2025.

Bespalko, S., Miranda, A. M. & Halychyi, O. 2018. Overview of the Existing Heat Storage Technologies: Sensible Heat. *Acta Innovation*, 28, 82–113. Saatavissa: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.28.8>. Viitattu: 11.9.2025.

Calderón-Vásquez, I., Segovia, V., Cardemil, J.M. & Barraza, R. 2021. Assessing the use of copper slags as thermal energy storage material for packed-bed systems. *Energy*, 227, 120370-. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120370>. Viitattu: 22.1.2026.

Diaz-Piloneta, M., Terrados-Cristos, M., Ortega-Fernandez, F., Martinez-Huerta, G. & Alvarez-Cabal V. 2025. Experimental characterization of iron mining tailings as sustainable material for thermal energy storage. *Scientific Reports*, 15, 40218. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24061-0>. Viitattu: 21.1.2026.

El Kouihen, F., Filali Baba, Y., AitOusaleh, H., Elharrak, A., Elalami, K., Bennouna, E. & Faik, A. 2023. Investigation of thermal energy storage system based on mining by-products for the recovery of Moroccan mining industrial waste heat. *Applied Thermal Engineering*, 230 (B), 120708. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120708>. Viitattu: 22.1.2026.

Georgousis, N., Diriken, J., Speetjens, M. & Rindt, C. 2025. Comprehensive review on packed-bed sensible heat storage systems. *Journal of Energy Storage*, 121, 116516, ISSN 2352-152X. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116516>. Viitattu: 21.1.2026.

Han, Y., Song, G., Tan, R., Ji, Y., Song, W. & Xu, Y. 2025. Characterization research of solid wastes as high-temperature solid particle thermal energy storage materials. *Journal of Energy Storage*, 133, 117989. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117989>. Viitattu: 22.1.2026.

Islam, Md. P. & Morimoto, T. 2018. Advances in low to medium temperature non-concentrating solar thermal technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2066-2093. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.030>. Viitattu: 10.9.2025.

Jacob, R., Sergeev, D. & Müller, M. 2022. Valorisation of waste materials for high temperature thermal storage: a review. *Journal of Energy Storage*, 47, 103645. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103645>. Viitattu: 21.1.2026.

Koçak, B., Fernández, A.I. & Paksoy, H. 2021a. Benchmarking study of demolition wastes with different waste materials as sensible thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 219, 110777. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110777>. Viitattu: 22.1.2026.

- Koçak, B., Fernández, A.I. & Paksoy, H. 2021b. Characterization of demolition waste powder to be processed as sensible thermal energy storage material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111283. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111283>. Viitattu: 12.9.2025.
- Lai, Z., Cen, K. & Zhou, H. 2022. Applicability of coal slag for application as packed bed thermal energy storage materials. *Solar Energy*, 236, 733-742. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.031>. Viitattu: 22.1.2026.
- Majó, M., Calderón, A., Svobodova-Sedlackova, A., Segarra, M., Fernández, A.I. & Barreneche, C. 2025. New database of sustainable solid particle materials to perform a material-based design for a thermal energy storage in concentrating solar power. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 281, 113309. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113309>. Viitattu: 22.1.2026.
- Segovia, V.A., Cardemil, J.M., Sancy, M. & Escobar, R. 2025. Analysis of copper slag from a Chilean foundry for application as filler material in thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 111, 115281. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115281>. Viitattu: 21.1.2026.
- Shen, Y., Liu, S., Mazhar, A. R., Han, X., Yang, L. & Yang, X. 2021. A review of solar-driven short-term low temperature heat storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, 110824. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110824>. Viitattu: 11.9.2025.
- Tawalbeh, M., Khan, H. A., Al-Othman, A., Almomani, F. & Ajith, S. 2023. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100326. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>. Viitattu: 11.9.2025.
- Xiong, Y., He, M., Wu, Y., Su, Y., Li, M., Yin, M., Zhang, A., Li, X., Li, S., Yang, Y., Tian, X. & Ding, Y. 2025. A comprehensive review on the utilization of industrial solid waste in thermal energy storage field. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 285, 113562. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113562>. Viitattu: 21.1.2026.
- Yang, L., Li, C., Da, Y., Zhang, J. & Wang, G. 2024. Environmentally responsible steel-slag-based solid particles for highly efficient and durable solar selective absorptance and thermal storage. *Journal of Cleaner Production*, 447, 141533. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141533>. Viitattu: 21.1.2026.
- Zhang, J., Guo, Z., Zhu, Y., Zhang, H., Yan, M., Liu, D. & Hao, J. 2024. Preparation and characterization of novel low-cost sensible heat storage materials with steel slag. *Journal of Energy Storage*, 76, 109643. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109643>. Viitattu: 11.9.2025.
- Zineb, E., Abdeslam, T., Lahoucine, O., Mohammed, C. & Lhaj El Hachemi, O. 2022. Selection and performance evaluation of waste and by-product materials for thermal storage applications. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 17, 888-899. Saatavissa: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac060>. Viitattu: 21.1.2026.