

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

NESTEMÄINEN ILMA ENERGIAVARASTO
Liquid Air Energy Storage

Työn tarkastaja: Markku Nikku
Työn ohjaaja: Markku Nikku
Lappeenrannassa 31.3.2021
Lauri Tehomaa

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Lauri Tehomaa
Nestemäinen ilma energiavarasto
Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Tutkijatohtori Markku Nikku
Ohjaaja: Tutkijatohtori Markku Nikku

33 sivua, 10 kuvaa ja 8 taulukkoa

Hakusanat: nestemäinen ilma, energiavarasto, LAES

Uusiutuvien energianlähteiden yleistymisen myötä energiantuotannossa on lisännyt energian tarjonnan ja kysynnän välistä vaihtelua. Tästä syystä energiavarastojen tarve on lisääntynyt, joilla voidaan tasata tarjonnan ja kysynnän välistä eroa, tai varastoida energiaa pitkäaikaisesti. Tässä kandidaatintyössä perehdytään yhteen vähän käytettyyn, potentiaaliseen energianvarastointitapaan, joka on nestemäinen ilma energiavarasto (LAES).

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää lukijalle LAES-prosessin toimintaperiaate, LAES-laitosten nykytilanne, pilottilaitoksen rakenne ja koeajojen tulokset, sekä LAES-prosessin potentiaalisuus teknillisestä ja taloudellisesta näkökulmasta osana Suomen sähköverkkoa. Työn painopiste on pilottilaitoksen rakenteessa ja koeajojen tuloksissa, sekä LAES-prosessin teknillisessä potentiaalissa, koska LAES-prosessin vähäisen käytön takia aiheeseen liittyvä kirjallisuus on rajallista ja painottuu lähinnä kyseisiin osa-alueisiin.

Työssä käy ilmi LAES-prosessin potentiaalisuus suuremman kokoluokan energiavarastona sen maantieteellisen riippumattomuuden, päästöttömän prosessin, sekä muihin energianvarastointitapoihin verrattuna kohtuullisten kustannuksien myötä. LAES-prosessin huonohko kokonaishyötysuhde on suurin kompastuskivi, jonka parantamiseen tutkimustyötä on panostettu. Tutkimusten myötä on löydetty tapoja, joilla kokonaishyötysuhde saadaan tasolle, jolla LAES-laitos on taloudellisesti kannattava.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	LAES-PROSESSI.....	7
2.1	Nestemäisen ilman valmistus ja varastointi.....	8
2.2	Nestemäisen ilman käyttö sähköntuotannossa.....	10
3	NYKYTILANNE.....	12
3.1	Rakennetut ja suunnitteilla olevat laitokset	12
3.2	Pilottilaitoksen rakenne ja koeajojen tulokset	13
4	LAES-PROSESSIN POTENTIAALISUUS.....	19
4.1	Vertailu muihin suuren mittakaavan energianvarastointitapoihin	19
4.2	Potentiaali teknillisestä näkökulmasta	22
4.3	Potentiaali taloudellisesta näkökulmasta	25
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	28
	LÄHDELUETTELO	30

LYHENNELUETTELO

CAES	Compressed Air Energy Storage, paineilmaparasto
LAES	Liquid Air Energy Storage, nestemäinen ilma energiavarasto
LCOS	Levelized Cost of Storage, energiavaraston tasoitettu kustannus
LNG	Liquid Natural Gas, nesteytetty maakaasu
MAC	Main Air Compressor, primääri-ilmakompressori
NPV	Net Present Value, nettonykyarvo
ORC	Organic Rankine Cycle, orgaaninen Rankine-prosessi
PE	polyeteeni
PHES	Pumped Hydroelectric Energy Storage, vesipumppuvoimalaitos
PP	polypropeeni
RAC	Recycle Air Compressor, kierrätysilmakompressori

1 JOHDANTO

Tietoisuus ilmastonmuutoksesta ja sen vaikutuksista on lisääntynyt ihmisten keskuudessa nopeasti. Ihmisten aikaansaamia päästöjä pidetään erittäin todennäköisenä syynä ilmaston lämpenemiseen. Päästöjen vähentäminen ja sitä kautta ilmastonmuutoksen hillintä on asia, jota on maailmanlaajuisesti valtiotasolla toteutettu esimerkiksi ilmastopöytäkirjojen kautta. Vuonna 2015 solmitun Pariisin ilmastopöytäkirjan päätavoitteena on pitää maapallon keskilämpötilan nousu alle kahdessa asteessa verrattuna esiteolliseen aikaan (Ympäristöministeriö. 2021). Tämän tavoitteen saavuttaminen vaatii energiateollisuuden osalta fossiilisten energialähteiden korvaamista uusiutuvilla energialähteillä. Suomi on maailman johtavia maita uusiutuvien energialähteiden hyödyntämisessä yli 40 prosentin osuudella energian loppukulutuksesta (Työ- ja elinkeinoministeriö. 2021). Uusiutuvien energialähteiden osuus sähkön kokonaistuotannosta vuonna 2019 oli 47 prosenttia, mikä vastasi 31 TWh:a sähköä (Tilastokeskus. 2020).

Uusiutuvien energialähteiden ongelmana on tuotetun sähkön määrän suuri vaihtelu. Aurinkovoima tuottaa eniten sähköä kesäkuukausina päiväsaikaan, mutta vastaavasti talvella tuotetun sähkön määrä on erittäin vähäistä. Tuulivoiman tuottama sähkö on täysin riippuvainen tuulen suunnasta ja nopeudesta. Ainoastaan vesivoimaa pystytään käyttämään säästövoimana, kun matalan sähkönkulutuksen aikaan vettä voidaan varastoida patoaltaaseen. Suomen osalta vesivoimaan valjastettavia vesialueita on rajatusti jäljellä ja nykyisiin vesivoimaloihin on kohdistunut paineita vesivoiman ympäristövaikutusten takia. Kulutuksen osalta vaihtelu näkyy selvästi käyttöpiikkeinä aamuisin ja iltaisin, mutta yöllä kulutus putoaa reilusti. Selkeää vaihtelua on myös havaittavissa kesän ja talven välillä johtuen suuresta rakennusten lämmitystarpeesta talvisin.

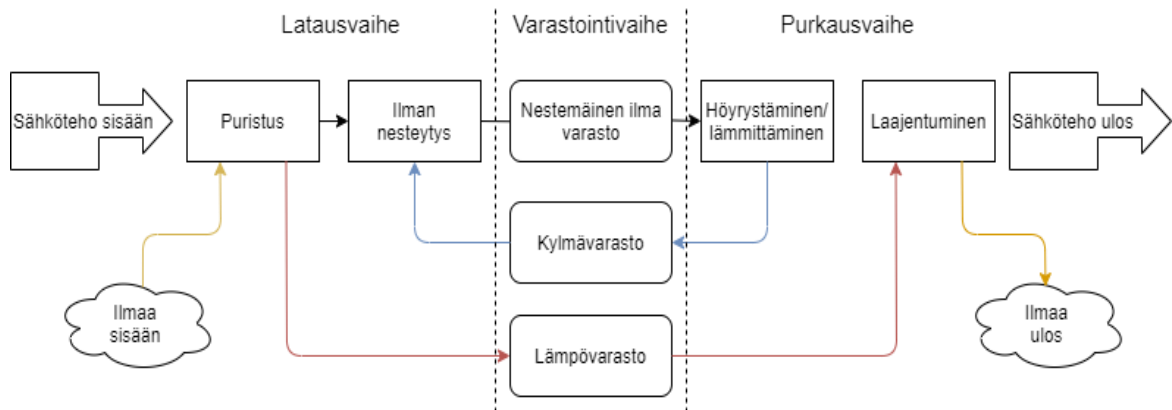
Kysynnän ja tarjonnan vaihtelevuus havaitaan sähkön kulutuksen ja tuotannon datasta. Vuonna 2019 tuntikohtainen sähkönkulutus vaihteli 5455 MWh:n ja 14542 MWh:n välillä. Vastaavasti tuntikohtainen sähköntuotanto vaihteli 3970 MWh:n ja 11195 MWh:n välillä. (Fingrid. 2019.) Sähkön tuotannon vajeusta paikattiin vuonna 2019 noin 20 TWh:lla tuontisähköä (Tilastokeskus. 2019).

Sähkön kysynnän ja tarjonnan tasapainottamisen avuksi on kehitetty useita erilaisia energiavarastoja, joihin ylimääräenergia voidaan säilöä lyhytaikaisesti tasoittamaan energian kysynnän ja tarjonnan eroa tai pitkäaikaisesti sähkön matalan kysynnän aikaan. Tähän mennessä ei ole kuitenkaan löytynyt päästötöntä energiavarastoa, jonka pystyisi rakentamaan maantieteellisesti riippumattomaan paikkaan kohtuullisin kustannuksin ja kapasiteetin. Vuonna 2011 yritys nimeltä Highview Power valmisti Iso-Britanniaan Sloughin kaupunkiin pilottilaitoksen, jossa energian varastointiin käytetään nestemäistä ilmaa (Highview Power. 2020a). Kyseessä on Liquid Air Energy Storage eli lyhennettynä LAES. Suomeksi käännettynä nestemäinen ilma energiavarasto. Yrityksen mukaan kyseinen prosessi on ratkaisu edellä mainittuihin energiavarastojen ongelmiin (Highview Power. 2020b).

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on antaa lukijalle käsitys LAES-prosessin toiminnasta ja nykytilanteesta, sekä selvittää LAES-prosessin potentiaalisuutta energiavarastona toimimiseen osana Suomen sähköverkkoa. Työssä perehdytään LAES-prosessin toimintaperiaatteeseen, LAES-laitosten nykytilanteeseen, pilottilaitoksen rakenteeseen ja koeajojen tuloksiin, sekä potentiaalisuuteen Suomen sähköverkon osana teknillisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Työn lopussa on esitettyä johtopäätökset LAES-prosessin soveltuvuudesta energiavarastona. LAES-laitosten vähäisen määrän vuoksi konkreettisia tuloksia on saatavilla ainoastaan pilottilaitoksen koeajoista. Myös LAES-prosessiin liittyvä kirjallisuus on rajallista. Se painottuu pilottilaitoksen koeajojen tuloksiin ja teknilliseen potentiaaliin, joten työn painopiste on kyseisissä aiheissa.

2 LAES-PROSESSI

Ensimmäisen kerran ideaa nestemäisen ilman käyttämisestä energiavarastona ehdotettiin vuonna 1977. Konsepti ei saanut tuolloin tuulta alleen, vaan vasta viime vuosikymmenenä kyseisen konseptin laajempi testailu on lähtenyt käyntiin. LAES-prosessi koostuu kolmesta eri vaiheesta; nestemäisen ilman valmistuksesta, nestemäisen ilman varastoinnista ja sähköntuotannosta nestemäisellä ilmalla (Sciacovelli et al. 2017, s. 86). Kuvassa 1 on selitettynä LAES-prosessin työvaiheet yksinkertaistettuna.



Kuva 1. LAES-prosessin työvaiheet (mukaillen Sciacovelli et al. 2017, s. 86)

Kuvasta 1 käy ilmi, että laitoksen kylmä- ja lämpövarastot ovat yhteydessä sekä lataus-, että purkausvaiheessa. Tällä kylmä- ja lämpöenergian kierrätyksellä on suuri rooli LAES-prosessin potentiaalisen kokonaishyötysuhteen saavuttamisessa, johon perehdytään myöhemmin tässä työssä.

Nestemäisen ilman valmistukseen on olemassa neljä erilaista prosessia; Linde-Hampson-, Kapitza-, Claude- ja modifioitu Claude-prosessi. Näistä prosesseista LAES-laitokseen parhaiten soveltuu modifioitu Claude-prosessi, koska kyseisen prosessin hyötysuhde on muita prosesseja selkeästi parempi, kuten alla olevasta taulukosta 1 voidaan huomata. (Borri et al. 2021, s. 3.) (Lamb & Pollet. 2020, s. 127.)

Taulukko 1. Nestemäisen ilman valmistusprosessien hyötysuhteeseen vaikuttavat suureet, sekä kokonaishyötysuhteet (Lamb & Pollet. 2020, s. 128)

Mitattu suure	Linde-Hampson-prosessi	Kapitza-prosessi	Claude-prosessi	Modifioitu Claude-prosessi
Nestemäisen ilman tuotto [%]	7,32	16,13	16,58	85,34
Energiankulutus [kWh/kg]	3,83	0,81	0,81	0,12
Exergiatehokkuus, energian lataaminen ja varastointi [%]	5,1	21,16	21,12	84,12
Exergiatehokkuus. energian purkaminen [%]	38,64	38,64	38,64	78,31
Kokonaishyötysuhde [%]	4,29	15,04	15,01	55,43

Tästä syystä työssä käydään läpi vain modifioidun Claude-prosessin yksityiskohtia. Nestemäisen ilman varastointiin ja käyttöön sähköntuotannossa toimintaperiaatteet ovat samankaltaisia nestemäisen ilman valmistusprosessista riippumatta.

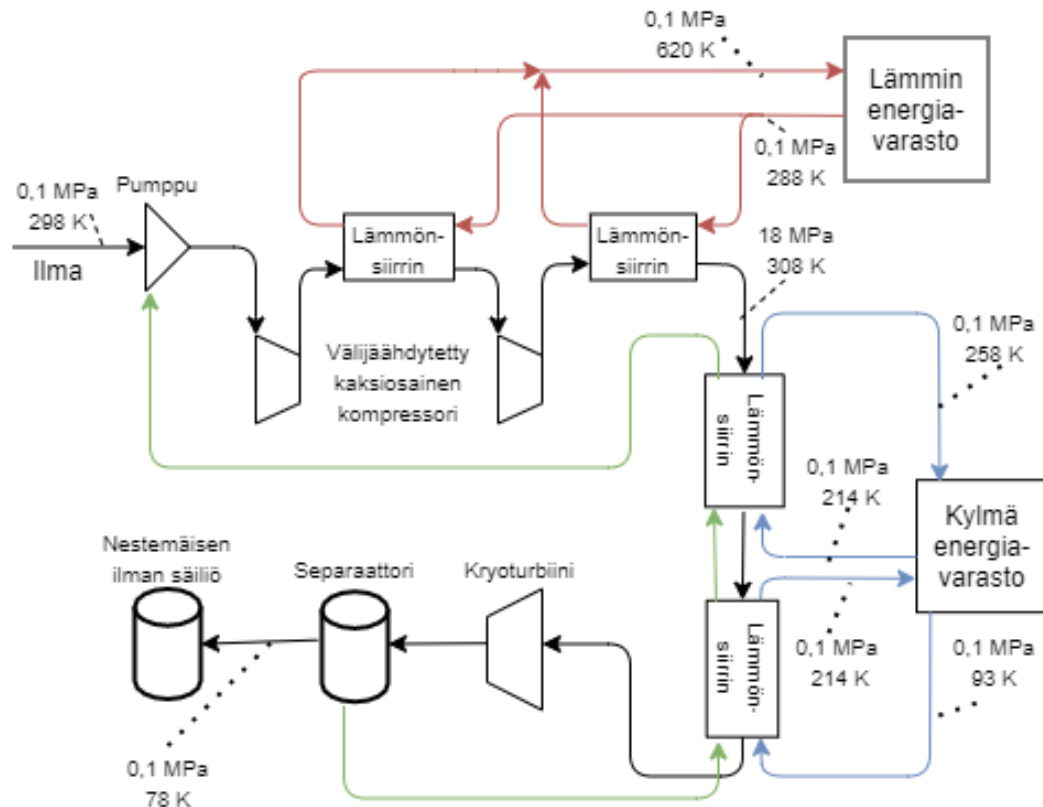
2.1 Nestemäisen ilman valmistus ja varastointi

Modifioitu versio Claude-prosessista vastaa normaalia Claude-prosessia suurelta osin. Muokkauksilla, joissa lämpö-/kylmäenergiaa varastoidaan, nestemäisen ilman valmistuksen hyötysuhdetta, ja sitä kautta LAES-prosessin kokonaishyötysuhdetta saadaan parannettua. Ympäristöstä imetään pumpulla ilmaa kaksiosaiseen, välijäähdytettyyn kompressoriin, jossa ilma puristetaan korkeaan paineeseen. Puristuksessa syntyvää lämpöenergiaa siirretään välijäähdytyksen aikana lämmitysöljyyn. Lämmennyt lämmitysöljy siirretään lämpövarastoon, missä sen lämpöenergiaa hyödynnetään myöhemmin nestemäisen ilman lämmittämisessä sähköntuotantoprosessin aikana. Paineistettu ilma ohjataan kahden lämmönsiirtimen läpi, jossa ilma jäähtyy ja luovuttaa lämpöenergiaansa lämmönsiirtimissä kulkevaan väliaineeseen. Parhaiten soveltuvat lämmönsiirrintyytit nestemäisen ilman valmistukseen ovat spiraali-, levy- ja regeneratiiviset lämmönsiirtimet, koska kyseiset

lämmönsiirrintyytit soveltuvat parhaiten kylmäteknisiin sovelluksiin (Borri et al. 2021, s. 6). Väliaine ohjataan kylmävarastoon, jossa kylmää väliainetta hyödynnetään nestemäisen ilman lämmittämisessä sähköntuotantoprosessin aikana. Tämän jälkeen paineistettu ja jäähdytetty ilma kulkeutuu kryogeniikkalaajentimeen, jossa se laajentuessaan muuttuu höyry-nesteseokseksi radikaalisti laskeneen paineen ja lämpötilan ansioista. Tätä ilman nesteytymisen aiheuttavaa jäähdytysilmiötä kutsutaan Joulen ja Thomsonin ilmiöksi. Seos ohjataan separaattoriin, jossa nämä kaksi faasimuotoa erotellaan keskipakovoiman avulla. Eroteltu kylmä ilma ohjataan aiemmin prosessissa esiintyneisiin kylmävarastoon liitettyihin lämmönsiirtimiin, jossa kylmä ilma hyödynnetään jäähdytyksessä. Syntynyt nestemäinen ilma siirretään säiliöön varastoitavaksi. (Lamb & Pollet. 2020, s. 121-124.)

Nestemäinen ilma varastoidaan valmistuksen jälkeen eristetyssä kryogeniikkasäiliössä, jossa nestemäinen ilma on lähes ilmakehän paineessa ja noin $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Nestemäistä ilmaa voidaan säilöä kuukausia ilman merkittäviä lämpö- tai ainehäviöitä. Nestemäisen ilman tilavuushäviö on noin 0,05 prosenttia päivää kohti. Tämä mahdollistaa LAES-laitoksen käyttämisen pitkäaikaisessa energian varastoinnissa. (Morgan et al. 2015, s. 845.)

Kuvassa 2 on edellä selitetyn nestemäisen ilman valmistuksen ja varastoinnin prosessikaavio suuntaa antavilla tilapisteiden arvoilla.

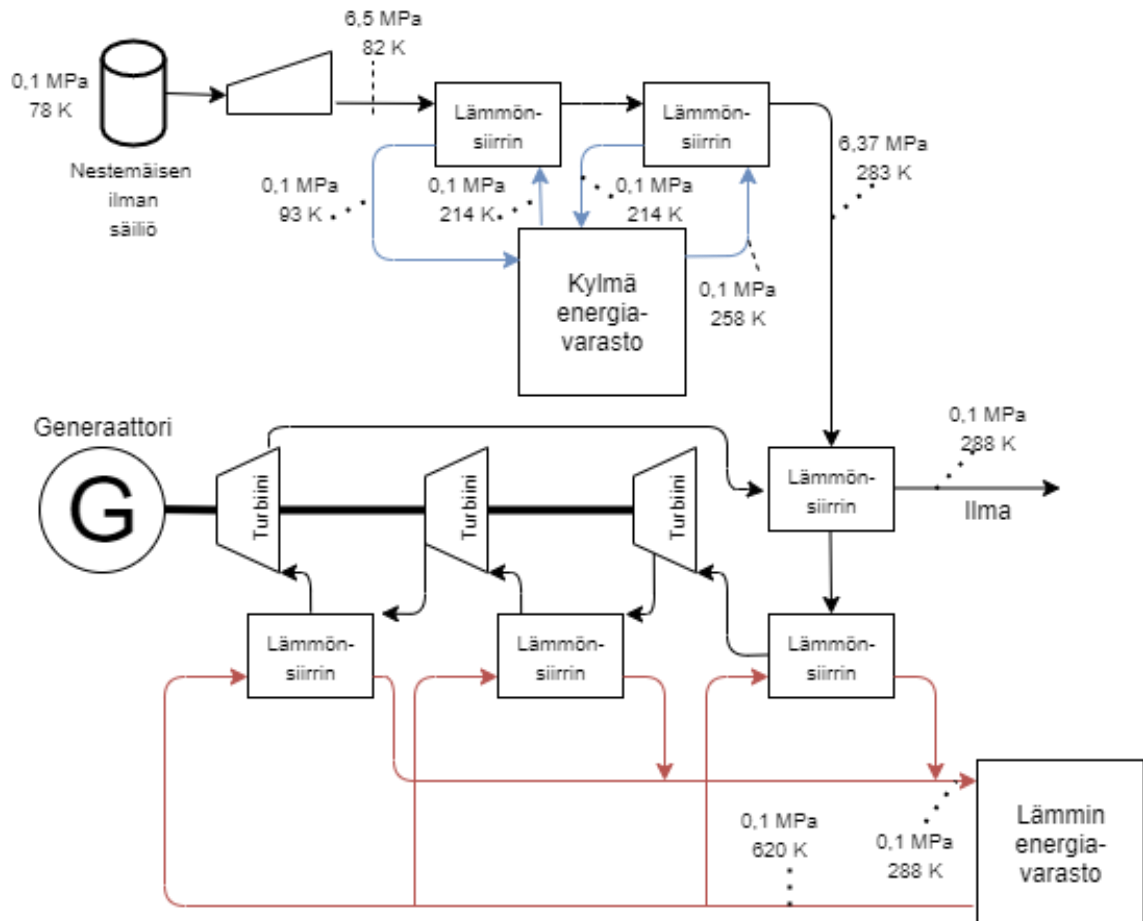


Kuva 2. Modifioitu Claude-prosessi suuntaa antavilla prosessin tilapisteiden arvoilla (mukaillen Lamb & Pollet. 2020, s. 125)

2.2 Nestemäisen ilman käyttö sähkötuotannossa

LAES-laitoksen sähköntuotantoprosessina käytetään yleensä Rankine-prosessia, mutta myös Brayton-prosessia voidaan käyttää laitoksen hyödynnettävissä olevan jätelämmön laadusta riippuen. Kun sähköä halutaan tuottaa, nestemäistä ilmaa imetään varastointitankista kryogeniikkapumpulla, jolloin nestemäisen ilman paine nousee. Paineistettu nestemäinen ilma lämmitetään lähelle ympäristön lämpötilaa lämmönsiirtimillä, jotka ovat yhteydessä samaan kylmävarastoon, joita käytetään nestemäisen ilman valmistuksessa ilman jäädytyksessä. Mikäli prosessin ulkopuolista jätelämpöä on saatavilla, voidaan paineistettu nestemäinen ilma lämmittää ympäristön lämpötilaa korkeammalle, jolloin LAES-prosessin kokonaishyötysuhde paranee (Borri et al. 2021, s. 5). Tämän jälkeen ilma tulistetaan tulistimessa nestemäisen ilman valmistuksessa lämmitetyn lämmitysöljyn avulla ja ohjataan turbiinien läpi. Turbiineissa on useampi vaihe, joiden välissä ilmaa tulistetaan lämpövarastoon liitetyillä lämmönsiirtimillä. Tämän avulla saadaan

useampi paisuntavaihe ja kokonaishyötysuhdetta suurennettua. Turbiinin roottori ja akseli pyörivät ilmapvirtauksen voimasta ja mekaaninen pyörimisenergia muutetaan generaattorilla sähköksi. (Guizzi et al. 2015, s. 1640.) Kuvassa 3 on edellä selitetyn sähköntuotantoprosessin prosessikaavio suuntaa antavilla tilapisteiden arvoilla.



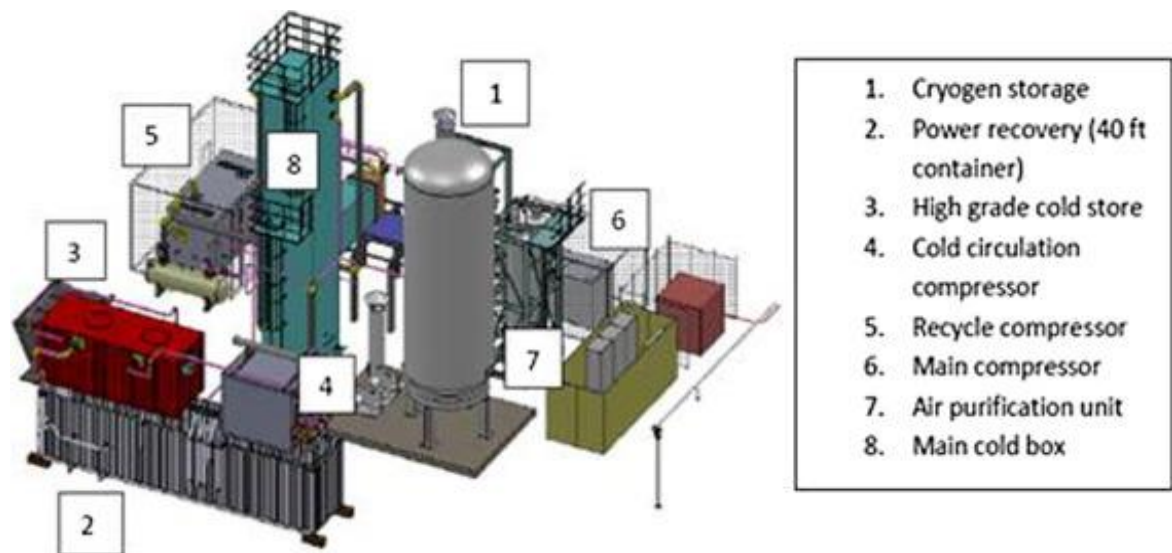
Kuva 3. Nestemäisen ilman käyttö sähköntuotannossa suuntaa antavilla prosessin tilapisteillä (mukailen Lamb & Pollet. 2020, s. 125)

Kuvan 2 ja 3 prosessikaaviot ovat esimerkkitapauksia mahdollisista LAES-laitoksen kokoonpanoista. Laitosten kokoonpanot voivat vaihdella käytettävien komponenttien määrän tai tyyppin suhteen. Esimerkkitapaukset perustuvat kuvan 1 LAES-prosessin työvaiheisiin, jotka ovat samat laitoksen kokoonpanosta riippumatta.

3 NYKYTILANNE

3.1 Rakennetut ja suunnitteilla olevat laitokset

Kuten johdannossa kävi ilmi, ensimmäinen LAES-laitos valmistui vuonna 2011 Highview Powerin toimesta Sloughin kaupunkiin SSE:n 80 MW:n biomassavoimalaitoksen yhteyteen. Kyseessä on pilottilaitos, jonka sähköntuotantoteho on 350 kW ja kapasiteetti 2,5 MWh. Pilottilaitos hyödynsi biomassavoimalaitoksen tuottamaa, noin 60 °C jätelämpöä sähkön tuottamiseen. Pilottilaitos läpäisi kolmen vuoden koeajan, jonka aikana se operoi Iso-Britannian säätövoimalaitoksena korkean sähkönkulutuksen ja talvikuukausien aikaan. Pilottilaitos on siirretty koeajan jälkeen Birminghamin yliopistoon lisätestauksiin ja akateemisen tutkimuksen tueksi. (Highview Power. 2020a.) Koelaitoksen valmistumisen jälkeen tietoisuus LAES-prosessin soveltuvuudesta energiavarastona on lisääntynyt ja sitä kautta LAES-prosessia käsittelevä kirjallisuuden määrä on kasvanut (Borri et al. 2021, s. 3). Pilottilaitoksen koeajojen tuloksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.



Kuva 4. Kuvituskuva Highview Powerin valmistamasta pilottilaitoksesta (Morgan et al. 2015, s. 849)

Sama yritys rakennutti vuonna 2018 maailman ensimmäisen täyden mittakaavan LAES-laitoksen Buryin kaupunkiin Pilsworthin kaatopaikan kaasuturbiinilaitoksen yhteyteen. Laitos hyödyntää kaasuturbiinilaitoksen tuottamaa matalalämpöistä jätelämpöä sähkön tuottamisessa. Kyseisen laitoksen sähköntuotantoteho on 5 MW ja kapasiteetti 15 MWh.

Laitos toimii lyhyen aikavälin reservienergiälähteenä ja tasaa sähköverkon vaihteluita talvisin. (Borri et al. 2021, s. 5.) (Pratt. 2018.)



Kuva 5. Ensimmäinen täyden mittakaavan LAES-laitos Pilsworthin kaatopaikan kaasuturbiinilaitoksen yhteydessä (Highview Power. 2018)

Highview Power aloitti ensimmäisen kaupallisen LAES-laitoksen rakentamisen vuoden 2020 loppupuolella Iso-Britanniaan Manchesterin lähistölle. Laitoksen tehoksi on kaavailtu 50 MW ja kapasiteetiksi 250 MWh. Laitos toimii itsenäisenä laitoksena, joka varastoi matalan kysynnän aikaan uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköä (Carrington. 2020). Laitoksen arvioitu käyttöönottovuosi on 2022. Laitoksesta tulee yksi Euroopan suurimmista energianvarastointisysteemeistä. (Papadopoulos. 2020.)

Myös Yhdysvaltoihin, Vermontin osavaltioon on suunniteltu liittovaltion ensimmäinen LAES-laitos, joka tulee olemaan teholtaan 50 MW ja kapasiteetiltaan 400 MWh (Collins. 2019a). Yrityksellä on myös suunnittelun alkumetreillä yhteensä 40 projektia ympäri maailmaa, joista suurimmat, teholtaan 200 MW ja kapasiteetiltaan 3 GWh tulevat sijoittumaan Lähi-Itään, Pohjois-Afrikkaan ja Latinalaiseen Amerikkaan (Collins. 2019b).

3.2 Pilottilaitoksen rakenne ja koeajojen tulokset

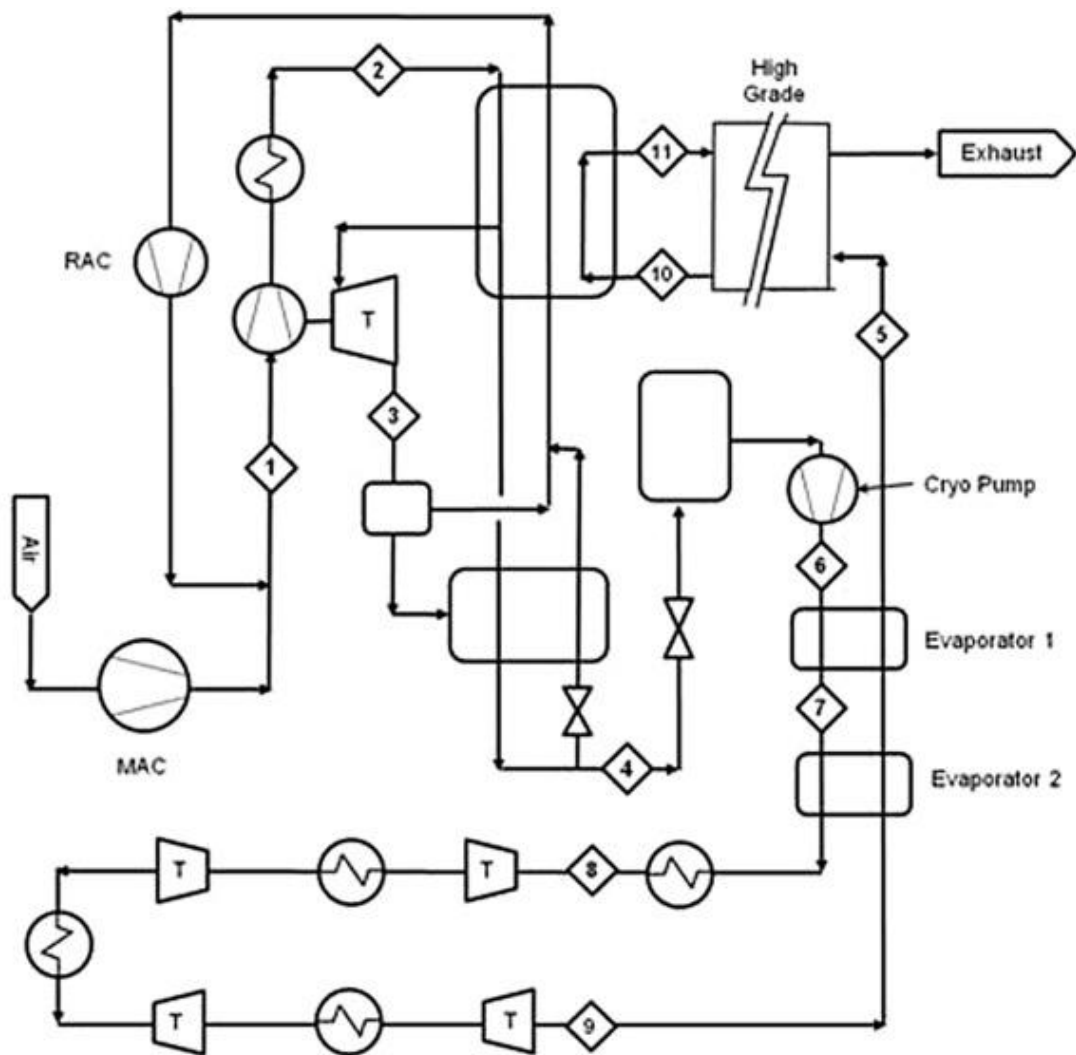
Tutkimustietoa LAES-laitoksista löytyy laajemmassa mittakaavassa ainoastaan Highview Powerin valmistamasta pilottilaitoksesta. Pilottilaitoksen ilman nesteyttäjä on Linde-Hampson-prosessilla toimiva, yhdellä turbiinilla varustettu Chengdu Air Separation -korporaation valmistama kokonaisuus. Nesteytyslaitoksessa on kaksi sähköisesti säädettävää ruuvikompressoria, joilla ilmaa syötetään ja kierrätetään prosessin aikana.

Prosessin aikana tuotettu kylmäenergia otetaan talteen ja varastoidaan korkealuokkaiseen kylmävarastoon. Pilottilaitoksessa käytetty kylmävarasto koostuu kahdeksasta sora-/kvartsiittipedistä. Pedit ovat asetettuna rahtikontin sisälle, joka on eristetty perliitillä eli vulkaanisella tuhalla. Pedit ovat yhteydessä toisiinsa kytkettyjen venttiilien avulla optimoidakseen kylmän säilymistä ja paineen putoamista. (Morgan et al. 2015, s. 849-850.)

Pilottilaitoksen sähköntuotantovaiheessa nestemäinen ilma lämmitetään kolmessa sarjaan kytketyssä lämmönsiirtimessä, joista kahden ensimmäisen lämpöenergia on peräisin turbiinien pakokaasuista ja viimeisen lämpövaraston lämmitetystä vesi-glykoliseoksesta. Tuotettu kylmäenergia otetaan talteen vain ensimmäisestä lämmönsiirtimestä, jolloin täyttää potentiaalia hyötysuhteen osalta ei saavuteta. Kaasuuntunut nestemäinen ilma ohjataan neljän sarjaan kytketyn radiaaliturbiinin läpi, joiden välissä kaasua tulistetaan vesi-glykoliseoksella lämmitetyillä tulistimilla. (Morgan et al. 2015, s. 848-849.)

Kylmävarasto oli ainoa komponentti pilottilaitoksesta, jota ei ollut suoraan saatavilla miltään valmistajalta. Halvan bulkkisoran käyttö kylmävarastossa oli tärkeää, jotta saavutettiin alhaiset valmistuskustannukset. Kylmävaraston tehokkuutta olisi pystynyt parantamaan käyttämällä bulkkisoran sijaan esimerkiksi terästä, kuparia tai alumiinia, mutta tällöin kustannukset olisivat nousseet liian korkeiksi (Borri et al. 2021, s. 9). Korkeat kustannukset korostuisivat etenkin kaupallisen mittakaavan laitoksessa, kun kylmävaraston koko on moninkertainen. Kahden vuoden koeajon aikana kylmävarasto kävi läpi noin sata työkiertoa, mutta minkäänlaista ongelmaa, kuten soran halkeilua ei havaittu. (Morgan et al. 2015, s. 851.)

Kuvassa 6 on esitettyä pilottilaitoksen prosessikaavio. Taulukossa 2 on taulukoituna kuvan 6 prosessikaavion numeroitujen tilapisteiden olosuhteet, joilla laitos toimii. Pilottilaitoksen prosessikaaviossa esiintyvä MAC (Main Air Compressor) tarkoittaa primääri-ilmakompressoria ja RAC (Recycle Air Compressor) kierrätysilmakompressoria.



Kuva 6. Pilottilaitoksen prosessikaavio (Morgan et al. 2015, s. 849)

Taulukko 2. Kuvan 6 pilottilaitoksen prosessikaavion tilapisteiden olosuhteet (Morgan et al. 2015, s. 850)

Tilapiste	Paine [bar]	Lämpötila [K]	Massavirta [kg/s]
1	10	301	2,3
2	12	298	2,3
3	1,3	84	1,8
4	12	98	0,4
5	1,2	106	2
6	56	104	2
7	56	109	2
8	51	337	2
9	1,7	262	2
10	1,2	115	0,4
11	1,0	296	0,4

Pilottilaitoksen koeajojen tuloksia käsitellään Morgan et al. kirjoittamassa artikkelissa sekä ajankäytön, että tehokkuuden osalta. Laitoksen käyttöaikojen tutkimista varten järjestettiin kymmenen päivän koeajot, jolloin LAES-laitoksen soveltuvuutta säätövoimalaitoksena testattiin (Morgan et al. 2015, s. 850). Taulukossa 3 on listattu kymmenen päivän koeajojen tuloksia ajankäytön osalta.

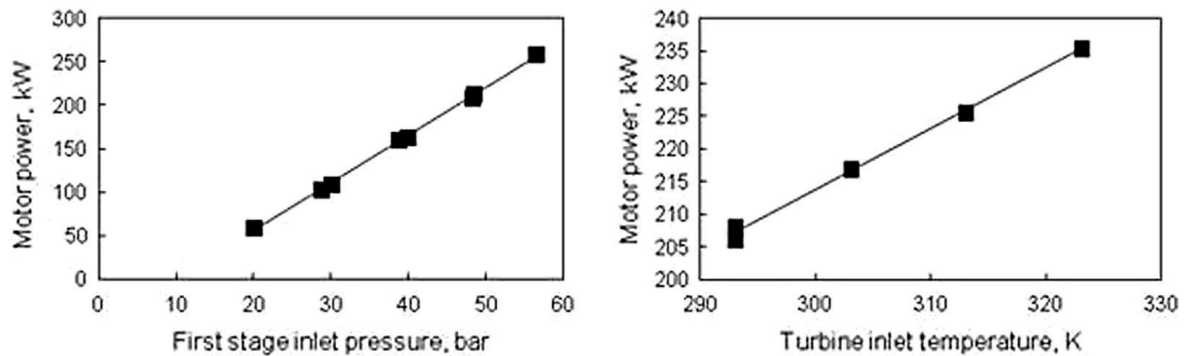
Taulukko 3. Pilottilaitoksen testiajon tulokset ajankäytön osalta (Morgan et al. 2015, s. 851)

	Aika	Prosenttiosuus ajasta
Koeajojen kesto	2160 minuuttia	100 %
Reagointiaika (käynnistyksestä latausvalmiuteen)	100 sekuntia	-
Kokonaisaika sähköntuotannossa	245 minuuttia	10,6 %
Kokonaisaika latauksessa	108 minuuttia	5 %
Kokonaisaika valmiustilassa	1800 minuuttia	84 %
Suunnittele mattomien seisokkien kesto	7 minuuttia	0,3%
Kokonaisaika valmiustilassa tai sähköntuotannossa	2045 minuuttia	94,5 %
Toimintavarmuus	2153 minuuttia	99,7 %

Koeajot osoittivat, että jopa pilottilaitosvaiheessa LAES-prosessi soveltuu toimintavarmuudeltaan hyvin säätövoimalaitokseksi. Esimerkiksi kaasuturbiinivoimalaitoksen reagointiaika on hitaampi, kun teholtaan vastaavan LAES-laitoksen. Tämä johtuu kaasuturbiinien suuresta hitausmomentista. LAES-laitoksen tapauksessa hitausmomentin sijaan reagointiaikaan vaikuttaa kylmän nestemäisen ilman lämmittämiseen kuluva aika, joka on pienempi, kun teholtaan vastaavan kaasuturbiinin pyörimisnopeuden saavuttaminen toiminta-arvoon. Pilottilaitos saavutti myös korkean, 99 prosentin tarkkuuden jatkuvasti muuttuvaan sähköntarpeen täyttämiseen, kun säätövoimalaitoksen kriteerin täyttymiseen vaaditaan 75 prosenttia. (Morgan et al. 2015, s. 851.)

Nestemäisen ilman tavoiteltu varastointilämpötila eli 115 K saavutettiin pilottilaitoksen testiajoissa. Lämpötilat turbiinin sisääntulossa vaihtelevat 288 K ja 343 K välillä, joka simuloi hyvin joko ympäristön lämmön tai jätelämmön käyttöä lämmönlähteenä. Pilottilaitoksen koeajojen aikana huippupaineet olivat nestemäisen ilman valmistuksen aikana 13 baaria ja sähköntuotannon aikana 60 baaria. Vastaavat optimaaliset täyden mittakaavan laitoksen huippupaineet täytyisi olla selkeästi korkeammat, nestemäisen ilman valmistuksessa noin 55 baaria ja sähköntuotannon aikana noin 150 baaria, jotta paras mahdollinen hyötysuhde saavutettaisiin ja laitos olisi taloudellisesti kannattava. Pilottilaitoksen matalat käyttöpaineet johtuivat pienehköstä budjetista ja pilottilaitoksessa käytetyistä komponenteista. Testiajojen aikana laitoksen kokonaishyötysuhteeksi saavutettiin 8 prosenttia, mikä johtuu pienen budjetin lisäksi laitoksen pienestä koosta, sekä kylmäenergian vähäisestä hyödyntämisestä, mikä jäi 51 prosenttiin. Jotta pilottilaitos olisi saavuttanut kokonaishyötysuhteeksi kaupallisen laitoksen mittakaavan tavoitearvon eli 50 prosenttia, olisi kylmäenergian hyödyntäminen täytynyt ylittää 91 prosenttiin. Lämpöenergian hyödyntämisessä pilottilaitos ylsi 49 prosenttiin. (Morgan et al. 2015, s. 850-852.)

Generaattorin akselitehoa eri vakiolämpötiloissa ja -paineissa testattiin koeajojen aikana. Kuvassa 7a turbiinin sisääntulolämpötila pidettiin vakiona 289 kelvinissä ja sisääntulopainetta nostettiin. Kuvassa 7b turbiinin sisääntulopaine pidettiin vakiona 48 baarissa ja sisääntulolämpötilaa nostettiin.



Kuva 7a. Turbiinin sisääntulopaineen vaikutus moottoritehoon lämpötilassa 289 K (Morgan et al. 2015, s. 850)

Kuva 7b. Turbiinin sisääntulolämpötilan vaikutus moottoritehoon paineessa 48 bar (Morgan et al. 2015, s. 850)

Molemmista kuvista voidaan huomata akselitehon lineaarinen muuttuminen joko painetta tai lämpötilaa nostaessa. Paineen tai lämpötilan nostolla saadaan siis suurempi teho irti ja samalla saavutetaan parempi kokonaishyötysuhde, mutta vain tiettyyn pisteeseen asti. Paineen osalta noin 200 baariin asti. Syötetystä lämpöenergiasta 45 prosenttia muuttui työksi. Tämä on korkea suhdeluku matalalämpöisen jätelämmön hyödyntämiselle. Esimerkiksi ORC-prosessin vastaava suhdeluku on noin 5-15 prosenttia. (Morgan et al. 2015, s. 850.)

Pilottilaitosprojektin alkuvaiheessa huolenaiheena oli nestemäisen ilman kerrostuminen varastointitankkiin. Tämä aiheuttaisi paikallisen hapen ylimäärän nestemäiseen ilmaan. Happirikkaan nestemäisen ilman yhdistyminen hiilivetyjen, kuten turbiinien voiteluöljyn kanssa voisi aiheuttaa tulipalon tai räjähdysen. Pilottilaitoksen rakennusvaiheessa kaikki nestemäisen ilman kanssa kontaktissa olevat osat käsiteltiin siten, että kerrostumia ei pääse syntymään. Kahden vuoden koeajon aikana minkäänlaisia todisteita happirikkaasta nestemäisestä ilmasta tai kerrostumisesta ei havaittu. (Morgan et al. 2015, s. 851.)

4 LAES-PROSESSIN POTENTIAALISUUS

4.1 Vertailu muihin suuren mittakaavan energianvarastointitapoihin

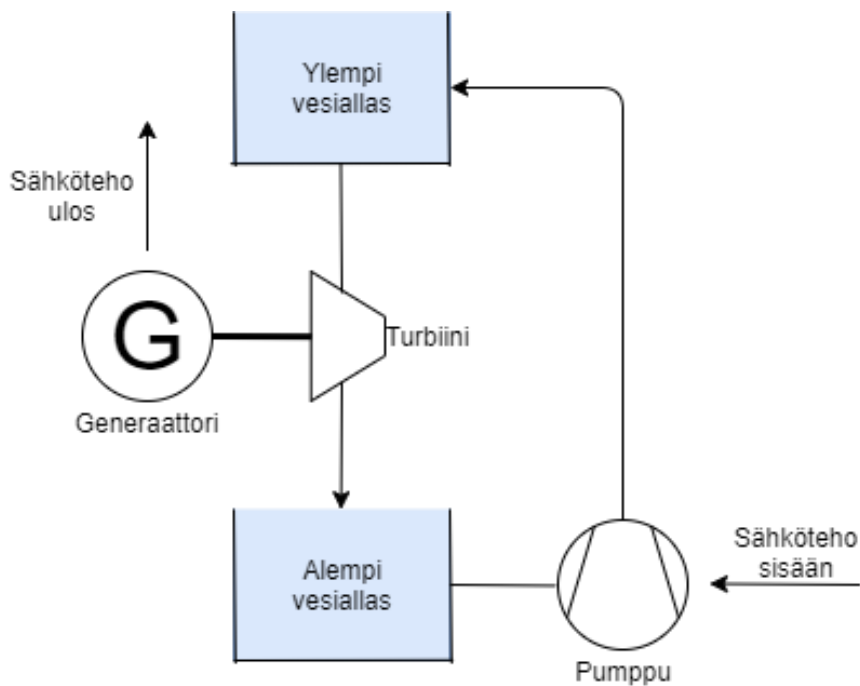
Nykyisistä energianvarastointitavoista potentiaalisiksi vaihtoehtoiksi suuremman kokoluokan energiavarastoiksi on osoitettu soveltuvaksi vesipumppuvoimalaitos (PHES), paineilmaparasto (CAES) ja nestemäinen ilma energiavarasto (LAES) (Borri et al. 2021, s. 1). Suuremman kokoluokan energiavarasto pystyy asennetulla tehollaan täyttämään kaupungin tai sitä suuremman alueen sähkön tarpeen. Kuvasta 8 ilmenee yleisimpien energiavarastointitapojen kokoluokat.



Kuva 8. Yleisimpien energiavarastointitapojen teholuokkia (Highview Power. 2021)

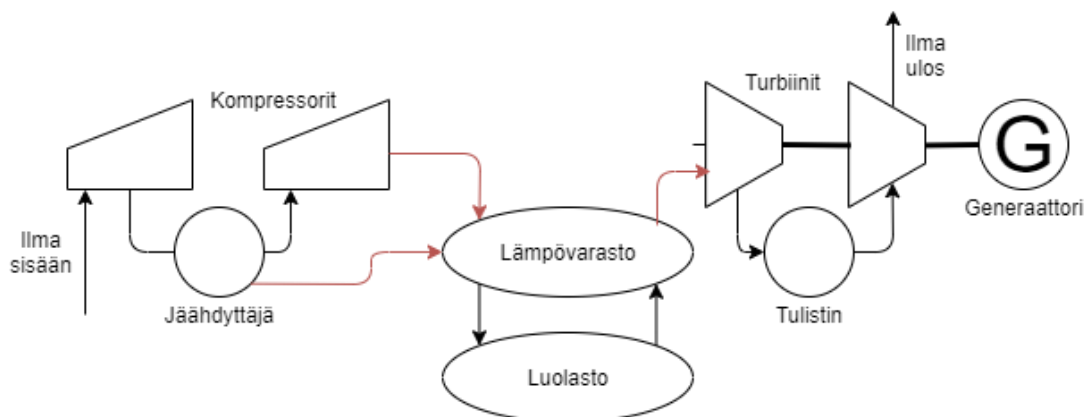
LAES-laitokset ovat teholtaan soveltuvia pienen kaupungin tai suuren kaupungin sähkön tarpeen täyttämiseksi. PHES-laitos ja maanalainen CAES-laitos ovat teholuokaltaan LAES-laitoksia suurempia. PHES-laitoksilla voidaan täyttää jopa pienen valtion sähkön tarve.

Ensimmäiset kaupalliset PHES-laitokset rakennettiin 1890-luvulla. Vuoden 2017 puoliväliin mennessä PHES-prosessi oli selkeästi käytetyin energianvarastointitapa. Kaikesta asennetusta energianvarastointikapasiteetista 96 prosenttia perustui PHES-laitoksiin. PHES-laitoksessa ylimääräsähköä käytetään pumpaamaan vettä alemmasta altaasta ylempään altaaseen. Altaiden välillä on suuri korkeusero. Kun sähköä tarvitaan, ylempään altaasta juoksetetaan vettä turbiinin läpi alemmahan altaaseen. Veden potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi, jonka voimasta turbiinin akseli pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. (IRENA. 2017, s. 14, 50.) (Lamb & Pollet. 2020, s. 119.)



Kuva 9. PHEs-prosessin toimintaperiaate (mukaiillen Lamb & Pollet. 2020, s. 119)

CAES-laitoksessa ylimääräsähköä käytetään ilman paineistamiseen. Paineistettu ilma varastoidaan maanalaiseen luolastoon. Sähköä tarvittaessa ilmaa imetään luolastosta. Ilma lämmitetään ja laajennetaan, jonka jälkeen se ajetaan turbiinin läpi. Ilmavirtauksen voimasta turbiinin akseli pyörittää generaattoria ja generaattori tuottaa sähköä. CAES-laitos vastaa toimintaperiaatteeltaan LAES-laitosta suurelta osin. Prosessissa nestemäisen ilman sijasta käytetään paineistettua ilmaa. (Lamb & Pollet. 2020, s. 120.)



Kuva 10. CAES-prosessin toimintaperiaate (mukaiillen Lamb & Pollet. 2020, s. 121)

Borri et al. kirjoittamassa artikkelissa vertaillaan LAES-, CAES- ja PHEs-laitoksia toisiinsa. Näiden kolmen varastointitavan ominaisuuksia on taulukoituna taulukossa 4.

Taulukko 4. LAES-, CAES- JA PHES-teknologioiden teknillisiä ominaisuuksia (Borri et al. 2021, s. 3)

Teknologia	Sähkön- tuottoteho [MW]	Sähkön- tuoton kesto [h]	Energia- tiheys [kWh/m ³]	Kokonais- hyötysuhde [%]	Maan- tieteellinen riippuvuus	Käyttö- ikä [vuosi]
LAES	1-300	4-24+	120-200	45-60	Ei	30-40
CAES	1-320	1-24+	3-20	38-60	Kyllä	20-40
PHES	100-5000	1-24+	0,5-1,5	65-87	Kyllä	40-60

Taulukosta huomataan, että LAES:n ja CAES:n samankaltaisuudesta johtuen molempien sähköntuotantoteho on hyvin samanlainen, mutta PHES:n sähköntuotantoteho on moninkertaisesti suurempi. Tämä johtuu PHES-laitosten suuremmasta koosta. Sähkön tuotannon kesto on suunnilleen yhtä pitkä kaikilla teknologioilla. Johtuen nestemäisen ilman korkeasta energiatiheydestä, samassa tilavuudessa säilötty kaasumainen ilma sisältää 10 kertaa vähemmän energiaa, kun nestemäinen ilma. Vastaavasti sama vesitilavuus sisältää 140 kertaa vähemmän energiaa, kun nestemäinen ilma. Tämä johtaa siihen, että nestemäiselle ilmalle tarvitaan paljon pienempi varastointitila, jolloin kustannukset pysyvät matalampana. Suuremman varastointitilan lisäksi PHES- ja CAES-laitokset ovat maantieteellisesti riippuvaisia, toisin kun LAES-laitos. PHES-laitos vaatii suuret vesialtaat, joiden välissä täytyy olla suuri korkeusero. CAES-laitoksen paineistetun ilman säilömiseen suositaan maanalaista luolastoa maan pinnalla sijaitsevien tankkien sijaan. Maantieteellisesti soveltuvat paikat näille laitoksille ovat vähissä. Tämä on suurin yksittäinen tekijä, mikä on lisännyt LAES-prosessin potentiaalisuutta verrattuna PHES- tai CAES-laitoksiin. PHES:n kokonaishyötysuhde on parempi, koska PHES-laitoksessa sähköntuotanto perustuu ainoastaan liike-energiaan, jolloin lämpöhäviöt eivät vaikuta kokonaishyötysuhteeseen, toisin kun LAES:n ja CAES:n kohdalla. Tutkimukset ovatkin panostaneet LAES-prosessin huonohkon kokonaishyötysuhteen parantamiseen, johon perehdytään tarkemmin kappaleessa 4.2. (Breeze. 2019, s. 233.) (Lamb & Pollet. 2020, s. 119-120.)

4.2 Potentiaali teknillisestä näkökulmasta

Kuten pilottilaitoksen koeajot jo osoittivat, LAES-laitokset ovat toimintavarmoja ja vastaavat hyvin muuttuvaan sähkön tarpeeseen säätövoimalaitoksena käytettäessä. Koska laitoksen prosessit pohjautuvat jo olemassa olevaan teknologiaan, kuten nestemäisen ilman valmistukseen ja höyryvoimalaitostekniikkaan, on laitosten komponenttien kehitys jo pitkällä ja tällöin LAES-laitoksien kapasiteetti ja teho saadaan rakennettua suuriksi säilyttäen samalla toimintavarmuuden. Myös komponenttien kunnossapito on kehittynyt pitkälle, jolloin komponentit ovat pitkäikäisiä ja toimivat oikealla tavalla. (Morgan et al. 2015, s. 846.)

LAES-laitos koostuu kolmesta eri yksiköstä, mikä tarkoittaa sitä, että nämä yksiköt voidaan mitoittaa eri kokoiseksi. Tämä mahdollistaa LAES-laitoksen optimaalisen mitoittamisen tehon ja kapasiteetin osalta eri käyttötarkoituksiin. Pienemmällä teholla ja suuremmalla kapasiteetilla laitos soveltuu energian pitkäaikaisempaan varastointiin. Jos esimerkiksi yön aikaista ylimääräsähköä varastoidaan LAES-prosessilla, asennetun tehon ei tarvitse olla suuri, jolloin alkuinvestointi jää pienemmäksi. Vastaavasti suuremmalla teholla ja pienemmällä kapasiteetilla laitos soveltuu säätövoimalaitokseksi. Koska energiaa säilötään lyhyehköjä aikoja, asennetun kapasiteetin ei tarvitse olla suuri, jolloin alkuinvestointi jää pienemmäksi. (Morgan et al. 2015, s. 846.)

LAES-laitoksessa voidaan hyödyntää matalalämpöistä hukkalämpöä tehokkaasti, koska LAES-prosessissa kiertoaineen lämpötilan ei tarvitse nousta satoihin celsiusasteisiin. Tämä tekee LAES-laitoksesta hyvän lisäyksen minkä tahansa laitoksen yhteyteen, jonka prosessista vapautuu hukkalämpöä, kuten esimerkiksi kaatopaikan jätteenpolttolaitoksen yhteyteen. Jätelämmön laadusta riippuen sähköntuotannossa voidaan käyttää joko Rankine- tai Brayton-prosessia. Matalalämpöistä jätelämpöä käytettäessä Rankine-prosessin ja suoran paisunnan kombinaatio on paras vaihtoehto, kun taas korkealämpöistä jätelämpöä käytettäessä Brayton-prosessin ja suoran paisunnan kombinaatio toimii paremmin. (Borri et al. 2021, s. 10.)

LAES-laitoksen sijoituspaikka ei ole maantieteellisesti sidonnainen, toisin kun vesipumppuvoimalaitoksella tai paineilmavarastolla. Vesipumppuvoimalaitos vaatii suuria korkeuseroja ja vesivarastoja. Paineilmavarasto vaatii suuria maanalaisia luolastoja. LAES-laitos voidaan sijoittaa käytännössä mihin vaan. Tämä on yksi LAES-prosessin suurimpia etuja, joka on lisännyt kiinnostusta LAES-prosessiin.

LAES-prosessin tutkimuksissa kylmäenergian hyödyntäminen on osoittautunut lämpöenergian hyödyntämistä tärkeämmäksi. Kylmäenergian häviö johtaa 7 kertaa suurempaan kokonaishyötysuhteen laskuun, kun vastaavan suuruinen lämpöenergian häviö (Borri et al. 2021, s. 9). Tutkimuksien mukaan kylmävaraston termistä hyötysuhdetta saadaan parannettua käyttämällä kvartsiittikiviä lämmönjohtimina. Tällöin voidaan saavuttaa jopa 85 prosentin terminen hyötysuhde. Myös muovit polypropeeni (PP) ja polyeteeni (PE), sekä natriumkloridi eli ruokasuola ovat varteen otettavia vaihtoehtoja (Hüttermann & Span. 2019, s. 244). (Sciacovelli et al. 2017, s. 87.)

Monet prosessit kuten nesteytetyn maakaasun (LNG) kaasuunnuttaminen tuottaa runsaasti kylmäenergiaa, joka menee useimmiten hukkaan. The Centre for Low Carbon Futures arvioi, että vuoteen 2030 mennessä Yhdistyneeseen kuningaskuntaan vuosittain tuodun nesteytetyn maakaasun määrä nousee 30 miljardiin kuutiometriin. Tämän nesteytetyn maakaasun määrän kaasuunnuttamisessa vapautuvalla kylmäenergialla voitaisiin tuottaa noin 8 miljoonaa tonnia nesteytettyä ilmaa vuosittain. Tällöin nesteytetyn maakaasuterminaalin yhteyteen rakennettu LAES-laitos toimisi paremmalla kokonaishyötysuhteella ja samalla nesteytetyn maakaasun kaasuunnuttamisessa syntyvä kylmäenergia saadaan hyödynnettyä. (Borri et al. 2021, s. 5.)

Monet tutkimukset ovat mallintaneet ja laskeneet itsenäisesti toimivan LAES-laitoksen potentiaalista kokonaishyötysuhtetta. Borri et al. kirjoittamassa artikkelissa on listattuna näiden tutkimuksien tuloksia ja laitoksen kokoonpanot, joilla tuloksiin on päästy. Taulukossa 5 on taulukoituna tutkimuksissa käytetyt nesteytysprosessit ja laitoksen kokonaishyötysuhde. Taulukossa 6 on vastaavasti taulukoituna tutkimuksissa käytetyt lämpö- ja kylmävarastot.

Taulukko 5. Tutkimuksissa mallinnettujen LAES-prosessien käyttämä nesteytysprosessi ja saavutettu kokonaishyötysuhde (Borri et al. 2021, s. 12)

Kirjoittajat	Nesteytysprosessi	Kokonaishyötysuhde
Guizzi et al. 2015	Linde-Hampson (maksimipaine 180 bar)	54-55 %
Xue et al. 2015	Linde-Hampson (maksimipaine 160 bar)	49 %
Krawczyk et al. 2016	Linde-Hampson (maksimipaine 150 bar)	57 %
Sciacovelli et al. 2017	Modifioitu Claude (maksimipaine 180 bar)	50 %
Peng et al. 2018	Linde-Hampson (maksimipaine 120 bar)	50-62 %

Taulukko 6. Tutkimuksessa mallinnettujen LAES-prosessien käyttämät lämpö- ja kylmävarastot (Borri et al. 2021, s. 12)

Kirjoittajat	Lämpövarasto	Kylmävarasto
Guizzi et al. 2015	Kaksi tankkia, lämmitysöljy	Kaksi tankkia, metaani ja propaani
Xue et al. 2015	Kaksi tankkia	Sorapeti
Krawczyk et al. 2016	Kaksi tankkia, lämmitysöljy	Kaksi tankkia, metanoli ja propaani
Sciacovelli et al. 2017	Kaksi tankkia, lämmitysöljy	Sorapeti
Peng et al. 2018	Kaksi tankkia, lämmitysöljy	Kaksi tankkia, metaani ja propaani

Kyseisten tutkimusten LAES-laitosten lasketut potentiaaliset kokonaishyötysuhteet pyörivät 50-60 prosentin luokassa. Kokonaishyötysuhdetta saataisiin vielä parannettua käyttämällä modifioitua Claude-prosessia Linde-Hampson-prosessin sijaan tai laitoksen sijoituksella esimerkiksi nesteytetyn maakaasuterminaalin yhteyteen. Tavoiteltu, yli 50 prosentin kokonaishyötysuhde on kuitenkin saavutettavissa ja riittävän korkea, jotta LAES-prosessi toimii myös kaupallisessa mittakaavassa taloudellisesti tuottavasti.

Suuremman mittakaavan LAES-laitoksesta ei ole konkreettisia tuloksia saatavilla. Morgan et al. kirjoittamassa artikkelissa mallinnettiin teholtaan 100 MW ja kapasiteetiltaan 600 MWh LAES-laitos. Kylmävaraston pedit oletettiin koostuvan kvartsiitista ja lämpövaraston työnesteenä käytetään etyleeniglykolia. Laitoksen investointikustannukset ovat sillä tasolla, mitä LAES-laitokselta voi odottaa. LAES-laitoksen kustannuksista kerrotaan lisää kappaleessa 4.3. Laitoksen toimintaparametreja on esitelty taulukossa 7. (Morgan et al. 2015, s. 852.)

Taulukko 7. Parametreja 100 MW/600 MWh LAES-laitokselle (Morgan et al. 2015, s. 852)

Parametri	
Purkausvaiheen turbiinien tulomassavirta	233 kg/s
Kompressorin tulomassavirta	103 kg/s
Kylmävaraston tilavuus	5800 m ³
Lämpövaraston massa	1763 tonnia
Nestemäisen ilman varastointisäiliön massa	5032 tonnia

Parametrien arvot eivät ole mahdottoman suuria, vaan vastaavat suunnilleen saman teholuokan höyryvoimalaitoksen parametreja. Vermontiin suunniteltu LAES-laitos on lähes tätä kokoluokkaa, joten sen valmistuttua isomman mittakaavan LAES-laitoksen toiminnasta ja potentiaalisuudesta saadaan konkreettisia tuloksia.

4.3 Potentiaali taloudellisesta näkökulmasta

LAES-laitoksia on hyvin vähän maailmalla, joten kustannuksista ei ole paljoa dataa saatavilla. Arvioidut kustannukset vaihtelevat tutkimuksesta riippuen. Tähän vaikuttaa myös laitoksen koko, sijoituspaikka sekä käytetyt komponentit. Tässä työssä arvioidut kustannukset ovat muutettu lähteiden hinnoista Google Finance -sivuston päivämäärän 29.3.2021 euron kurssin mukaisiksi hinnoiksi. Ensiksi tarkastellaan laitoksen alkuinvestointeja, jonka jälkeen tarkasteluun otetaan myös koko elinkaaren aikaiset kustannukset.

Breezen kirjoittaman teoksen mukaan nestemäinen ilma energiavaraston alkuinvestoinnin suuruutta voidaan arvioida paineilmaparaston alkuinvestoinneilla. Yhdysvalloissa sijaitsevien CAES-laitosten alkuinvestoinnit vaihtelevat 340 €/kWh ja 764 €/kWh riippuen laitoksen koosta ja ilman varastointitavasta. Nestemäisen ilman valmistukseen tarkoitettut laitokset ovat kuitenkin kalliita. LAES-laitoksen arvioitu alkuinvestointi voi nousta jopa 1443 €/kWh asti. (Breeze. 2019, s. 233-234.)

Taulukossa 6 on taulukoituna LAES-, CAES- ja PHES-laitoksien alkuinvestoinnit Borri et al. kirjoittaman artikkelin mukaan.

Taulukko 8. LAES-, CAES- ja PHES-teknologioiden alkuinvestoinnit muutettuna päivän 29.3.2021 euron kurssin mukaiseksi (Borri et al. 2021, s. 3)

Teknologia	Investointi sähköntuotantoyksikköön [€/kW]	Investointi varastointiyksikköön [€/kWh]
LAES	765-5100	204-544
CAES	824-4245	3-187
PHES	510-1700	850-4245

Taulukosta huomataan, että alkuinvestointina PHES-laitoksen sähköntuotantoyksikkö on halvempi, kun CAES- tai LAES-laitoksen. Tämä johtuu PHES-laitoksen sähköntuotantoyksikön yksinkertaisesta rakenteesta, mikä vastaa vesivoimalaitoksen rakennetta. CAES- ja LAES-laitoksien sähköntuotantoyksiköiden alkuinvestoinnit ovat lähellä toisiaan molemmissa käytetyn teknologian samankaltaisuuden takia. Varastointiyksikön alkuinvestointi on selkeästi pienin CAES-laitoksella. Investointi on pienempi, mikäli maanalaista luolastoa on saatavilla ja suurempi, jos paineistettu ilma joudutaan säilömään maan pinnalla sijaitsevilla säiliöissä. LAES-laitoksen varastointiyksikön alkuinvestointi on noin kaksinkertainen verrattuna CAES-laitokseen johtuen ilman monimutkaisemmasta käsittelytavasta. PHES-laitoksen varastointiyksikön alkuinvestointi on selkeästi korkein johtuen PHES-laitoksen vaatimien valtaviin vesialtaiden takia. Taulukosta käy ilmi, että muihin suuremman mittakaavan energiavarastoihin verrattuna LAES-laitoksen alkuinvestointi on kohtuullinen.

Energiavaraston koko elinkaaren kustannuksia voidaan arvioida LCOS:lla eli energiavaraston tasoitetulla kustannuksella (Levelized Cost Of Storage). LCOS tarkoittaa energiavaraston kokonaiskustannusta suunnittelusta laitoksen elinkaaren loppuun tuotettua megawattituntia kohti. LCOS ottaa myös huomioon diskonttauksen eli tulevaisuuden rahavirran nykyarvon laskemisen. (Nexant. 2019.)

Xie et al. vuoden 2019 tutkimuksessa laskettiin LAES-laitoksen energiavaraston tasoitettuja kustannuksia, kun kyseessä oli laitos, jonka teho on 25 MW ja kapasiteetti on 125 MWh. Konservatiivisella arvioinnilla eli oletetulla 50 prosentin kokonaishyötysuhteella sähköenergian tasoitetuksi kustannukseksi tuli 704 €/MWh. Nykytilanteen arvioinnilla eli oletetulla 55 prosentin kokonaishyötysuhteella kustannukseksi tuli 382 €/MWh. Tulevaisuuden potentiaalin arvioinnilla eli oletetulla 60 prosentin kokonaishyötysuhteella kustannukseksi tuli 228 €/MWh. Tuloksista käy ilmi, että prosessin kokonaishyötysuhteella on erityisen suuri vaikutus laitoksen elinkaaren aikaisiin kustannuksiin. Alle 200 €/MWh LCOS-arvoon voidaan päästä, jos LAES-laitos on integroitu nestemäisen maakaasuterminaalien yhteyteen, jossa nestemäisen maakaasun kaasuunuttamisesta syntyvää kylmäenergiaa voidaan hyödyntää nestemäisen ilman valmistuksessa. (Xie et al. 2019, s. 4858.)

LAES-laitoksen koon ja kokonaishyötysuhteen lisäksi taloudellinen tuottavuus on hyvin sidonnainen myös käytetyn jätelämmön laadusta. Xie et al. vuoden 2018 tutkimuksessa selvisi, että ilman jätelämmön käyttämistä LAES-laitos ei olisi taloudellisesti tuottava. Positiivinen nettonykyarvo (NPV) on saavutettavissa ainoastaan yli 150 celsiusasteista jätelämpöä käyttävällä 200 MW LAES-laitoksella. Takaisinmaksuaika saadaan laskettua 25,7 vuodesta 5,6 vuoteen käyttämällä 250 celsiusasteen jätelämpöä. (Xie et al. 2018, s. 255-256.) Tässäkin tapauksessa laadultaan parempi jätelämpö parantaa kokonaishyötysuhdetta, joka korreloi suoraan elinkaaren aikaisiin kustannuksiin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää nestemäinen ilma energiavaraston eli LAES:n potentiaalisuutta energianvarastointitapana teknillisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Tarkastelussa oli erityisesti soveltuvuus energian pitkäaikaisvarastointiin, sekä säätövoimalaitoksena toimimiseen osana Suomen sähköverkkoa. Työssä käytiin läpi LAES-prosessin toimintaperiaatetta, rakennettuja sekä suunnitteilla olevia LAES-laitoksia, ensimmäisen LAES-pilottilaitoksen rakennetta ja koeajojen tuloksia, sekä LAES-prosessin potentiaalia teknillisestä ja taloudellisesta näkökulmasta.

Uusiutumattomien energiamuotojen käyttöä pyritään jatkuvasti vähentämään maailmalla ja tästä aiheutuvaa energiantuoton vajausta paikataan uusiutuvilla energiamuodoilla. Lisääntyneen uusiutuvan energian käytön myötä energiavarastojen tarve on noussut johtuen uusiutuvien energiamuotojen vaihtelevasta energiantuotosta. Energiavarastointitapoja on monia, mutta jokaisella teknologialla on omat huonot puolensa. Potentiaalisiksi suuremman mittakaavan energianvarastointitavoiksi on osoittautunut vesipumppulaitokset (PHES) ja paineilmalaitokset (CAES). Näiden energiavarastointitapojen suurin kompastuskivi on maantieteellinen riippuvuus. PHES-laitos vaatii suuria vesialtaita ja niiden välistä suurta korkeuseroa. CAES-laitoksen paineistama ilma olisi järkevämpi varastoida suuriin maanalaisiin luolastoihin, kun maanpäällisiin suuriin säiliöihin. Mahdolliset PHES- ja CAES-laitosten sijainnit ovat jo nykyisellään tiukassa, etenkin Suomen maantiedettä ajatellen.

Uutena teknologiana sekä LAES-laitosten, että niihin liittyvien tutkimusten määrä on vielä pieni. Vasta lähivuosina ensimmäinen kaupallisen mittakaavan laitos on valmis, eikä lukkoon lyötyjä projekteja ole kovin montaa. Pilottilaitoksen koeajot ja siitä tehdyt tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet LAES-prosessin potentiaalisiksi suuremman kokoluokan energianvarastointitavaksi. LAES-prosessi mahdollistaa päästötöntä energian varastointia ilman maantieteellistä riippuvuutta hintaan, joka on muiden edellä mainittujen energiavarastointitapojen tasolla. Nesteytetyn ilman suuri energiatiheys mahdollistaa laitoksen komponenttien, etenkin varastointisäiliön pienen koon. Lisäksi lataus-, varastointi- ja purkausvaihe ovat erillisiä, joka mahdollistaa LAES-laitoksen joustavan mitoituksen eri sovelluksiin, kuten energian pitkäaikaisvarastointiin ja säätövoimalaitoksena toimimiseen.

LAES-prosessin huonohko kokonaishyötysuhde on asia, jonka parantamiseen tutkimuksia on kohdistettu ja tullaan kohdistamaan. LAES-prosessi on kuitenkin taloudellisesti kannattava saavuttaessaan vähintään 50 prosentin kokonaishyötysuhteen, minkä ovat monet tutkimukset osoittaneet olevan saavutettavissa. Myös mahdollisesti saatavilla olevan jätelämmön laatu vaikuttaa suuresti LAES-laitoksen taloudelliseen kannattavuuteen. Monet tutkimukset ovat osoittaneet, että prosessissa talteen otetun kylmäenergian kierrätys on tärkein LAES-prosessin kokonaishyötysuhteeseen vaikuttava asia. Tulevaisuuden laitoksissa kylmävarastoon panostaminen on ensisijaisen tärkeää, jotta kokonaishyötysuhde saadaan taloudellisesti tuottavan laitoksen tasolle.

LAES-prosessi vaikuttaa hyvältä vaihtoehdolta suuremman kokoluokan energiavarastointitavaksi ajatellen Suomen sähköverkkoa. PHES- ja CAES-laitoksien maantieteellinen riippuvuus on ongelma, joka korostuu etenkin Suomen maantiedettä ajatellen. Suomen pienet korkeuserot ja vähäiset ilman varastointiin valjastettavat luolastoalueet eivät tue PHES- ja CAES-laitosten rakentamista. LAES-laitokset olisivat erittäin hyvä lisä esimerkiksi jätteenpolttolaitosten tai ydinvoimalan yhteyteen, jolloin kyseisissä prosesseissa hukattu jätelämpö saataisiin hyödynnettyä LAES-prosessissa ja paras mahdollinen potentiaali voidaan saavuttaa.

LÄHDELUETTELO

Borri Emiliano, Tafone Alessio, Romagnoli Alessandro, Comodi Gabriele. 2021. A review on liquid air energy storage: History, state of the art and recent developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 137. 24 sivua. ISSN 1364-0321. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 28.1.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110572>

Breeze Paul. 2019. Power Generation Technologies. 3rd Edition. Elsevier. 449 sivua. ISBN: 978-0-0810-2631-1

Carrington Damian. The Guardian. 2020. Climate emission killer: construction begins on world's biggest liquid air battery. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 5.3.2021]. Saatavissa: <https://www.theguardian.com/environment/2020/jun/18/worlds-biggest-liquid-air-battery-starts-construction-in-uk>

Collins Leigh. Recharge News. 2019a. First commercial liquid air energy storage facility to be built in the US. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavissa: <https://www.rechargenews.com/transition/first-commercial-liquid-air-energy-storage-facility-to-be-built-in-the-us/2-1-726833>

Collins Leigh. Recharge News. 2019b. First commercial liquid air storage project gets go-ahead. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavissa: <https://www.rechargenews.com/transition/first-commercial-liquid-air-storage-project-gets-go-ahead/2-1-692182>

Fingrid. 2019. Sähkön kulutus ja tuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.11.2020]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>

Google Finance. 2021. Valuutat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 29.3.2021]. Saatavissa: <https://www.google.com/finance>

Guizzi Giuseppe Leo, Manno Michele, Ludovica Tolomei Maria, Vitali Ruggero Maria. 2015. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system. Energy. Volume 93 part 2. s. 1639-1647. ISSN 0360-5442. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 28.1.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.030>

Highview Power. 2020a. Plants. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.11.2020]. Saatavissa: <https://highviewpower.com/plants/>

Highview Power. 2020b. Benefits. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.12.2020]. Saatavissa: <https://highviewpower.com/benefits/>

Highview Power. 2021. Technology. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.3.2021]. Saatavissa: <https://highviewpower.com/technology/>

Hüttermann Lars, Span Roland. 2019. Influence of the heat capacity of the storage material on the efficiency of thermal regenerators in liquid air energy storage systems. Energy. Volume 174. s. 236-245. ISSN 0360-5442. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 25.2.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.149>

IRENA. 2017. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency, [E-kirja]. 132 sivua. ISBN: 978-92-9260-038-9. [Viitattu 22.2.2021]. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>

Lamb Jacob J., Pollet Bruno G. 2020. Micro-Optics and Energy; Sensors for Energy Devices. 1st edition. Springer Nature Switzerland AG 2020. 207 sivua. ISBN 978-3-030-43675-9

Morgan Robert, Nelmes Stuart, Gibson Emma, Brett Gareth. 2015. Liquid air energy storage – Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant, Applied Energy. Volume 137. s. 845-853. ISSN 0306-2619. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 4.1.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.109>

Nexant. 2019. LCOS – A Key Metric for Cost of Energy Storage. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 30.3.2021]. Saatavissa: <https://www.nexant.com/resources/lcos-key-metric-cost-energy-storage>

Papadopoulos Loukia. Interesting Engineering. 2020. World's First Commercial Liquid Air Energy Storage Facility Begin Construction This Year. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 17.12.2020]. Saatavissa: <https://interestingengineering.com/world-first-commercial-liquid-air-energy-storage-facility-begin-construction-this-year>

Pratt David. Energy Storage News. 2018. World first grid-scale liquid air energy storage project completed in northern England. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 2.12.2020]. Saatavissa: <https://www.energy-storage.news/news/world-first-grid-scale-liquid-air-energy-storage-project-completed-in-north>

Sciacovelli A., Vecchi A., Ding Y. 2017. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage – From component to system level performance through dynamic modelling, Applied Energy. Volume 190. s. 84-98. ISSN 0306-2619. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 26.1.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.118>

Tilastokeskus. 2018. Uusiutuvan energian käyttö jatkoi kasvuaan vuonna 2017. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 18.11.2020]. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/ehk/2017/ehk_2017_2018-12-11_tie_001_fi.html

Tilastokeskus. 2020. Uusiutuvilla polttoaineilla tuotettiin 2019 ensimmäistä kertaa enemmän kaukolämpöä kuin fossiilisilla polttoaineilla. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 18.11.2020]. Saatavissa: http://tilastokeskus.fi/til/salatuo/2019/salatuo_2019_2020-11-03_tie_001_fi.html

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2021. Uusiutuva energia Suomessa. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: <https://tem.fi/uusiutuva-energia>

Xie Chunping, Hong Yan, Ding Yulong, Li Yongliang, Radcliffe Jonathan. 2018. An economic feasibility assessment of decoupled energy storage in the UK: With liquid air energy storage as a case study. Applied Energy. Volume 225. s. 244-257. ISSN 0306-2619. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.074>

Xie Chunping, Li Yongliang, Ding Yulong, Radcliffe Jonathan. 2019. Evaluating Levelized Cost of Storage (LCOS) Based on Price Arbitrage Operations: with Liquid Air Energy Storage (LAES) as an Example. Energy Procedia. Volume 158. s. 4852-4860. ISSN 1876-6102. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 12.12.2020]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.708>

Ympäristöministeriö. 2021. Pariisin ilmastopimus. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus>