Tampereen yliopisto

Olli Tammenlarva

KORKEAN LÄMPÖTILAN LÄMPÖVA-RASTOJEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖ- JA LÄMPÖENERGIAN VARASTOINNISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Asko Ellman
Huhtikuu 2025

TIIVISTELMÄ

Olli Tammenlarva: Korkean lämpötilan lämpövarastojen hyödyntäminen sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2025

Ilmastonmuutoksen hillintä edellyttää siirtymistä vähäpäästöisiin energiaratkaisuihin, mikä on lisännyt uusiutuvien, sääriippuvaisten energialähteiden, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, käyttöä. Näiden tuotantomuotojen vaihtelevuus on lisännyt tarvetta tehokkaille energian varastointiratkaisuille. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan korkean lämpötilan lämpövarastojen (High Temperature Thermal Energy Storage, HT-TES) hyödyntämistä sähkö- ja lämpöenergian varastoinnissa.

Työssä esitellään ensin energian varastoinnin perusperiaatteet ja tärkeimmät sähkö- ja lämpöenergian varastointiteknologiat. Erityishuomio kohdistetaan korkean lämpötilan lämpövarastointiin, jossa lämpöenergia varastoidaan tuntuvana tai latenttina lämpönä. Tämän jälkeen tarkastellaan, miten lämpöenergiaa voidaan muuntaa sähköksi lämpövoimakoneiden, kuten Brayton-, Rankine- ja Stirling-kiertojen avulla. Työssä käsitellään myös lämpövarastojen integrointia yhteistuotantolaitoksiin (CHP), joissa tuotetaan sekä sähköä että lämpöä.

Työssä hyödynnetään kirjallisuuslähteitä ja mallinnuksia eri varastointimenetelmien hyötysuhteiden ja kannattavuuden arvioimiseksi. Tuloksissa nostetaan esiin, että korkean lämpötilan lämpövarastot voivat merkittävästi parantaa uusiutuvan energian joustavuutta ja järjestelmätasapainoa. Lisäksi tarkastellaan koelaitoksia ja niiden toteutusratkaisuja. Työ osoittaa, että lämpöakkujen yhdistäminen sähkö- ja lämpömarkkinoihin voi tukea siirtymää kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää.

Avainsanat: lämpövarasto, korkean lämpötilan lämpövarastointi, energian varastointi, sähköntuotanto, CHP, Brayton-kierto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Olli Tammenlarva: Utilization of High-Temperature Thermal Energy Storage in Electricity and Heat Storage
Bachelors
Tampere University
Mechanical engineering
April 2025

To mitigate climate change, energy systems are transitioning towards low-emission solutions, increasing the share of weather-dependent renewable sources such as wind and solar power. However, the variability of these sources creates challenges for maintaining a stable energy supply. This bachelor's thesis examines the utilization of High Temperature Thermal Energy Storage (HT-TES) systems for storing electrical and thermal energy.

The study first introduces the basic principles of energy storage and presents key technologies for storing both electricity and heat. Particular focus is given to high-temperature storage methods, in which energy is stored as either sensible or latent heat. The thesis then explores how thermal energy can be converted into electricity using thermodynamic cycles such as Brayton, Rankine, and Stirling cycles. It also considers the integration of thermal storage into Combined Heat and Power (CHP) systems for simultaneous production of electricity and heat.

The work is based on literature and modeling studies to evaluate the efficiency and economic feasibility of different storage methods. The results show that HT-TES can significantly improve the flexibility of renewable energy systems and support grid stability. Practical examples from demonstration projects are discussed. The findings suggest that large-scale adoption of thermal batteries integrated with both electricity and heat markets can contribute to achieving carbon-neutral energy systems.

Keywords: thermal energy storage, high-temperature storage, energy storage, electricity production, CHP, Brayton cycle

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: ChatGPT

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT 4o

Käyttötarkoitus: Käytin tekoälysovellusta lähdeartikkelien suomentamiseen, työn yleisen rakenteen suunnitteluun, muotovirheiden etsimiseen sekä tiivistelmän ja johdannon kirjoittamisen apuna.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Johdanto, tiivistelmä

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. ENERGIAN VARASTOINTI 2
2.1 Sähköenergian varastointi 2
2.1.1 Akut 3
2.1.2 Pumppuvoimalaitokset 3
2.1.3 Vauhtipyörät 3
2.2 Lämpöenergian varastointi 4
3. KORKEAN LÄMPÖTILAN LÄMPÖVARASTOT 6
3.1 Tuntuvan lämmön varastointi 6
3.2 Latentin lämmön varastointi 7
4. KORKEAN LÄMPÖTILAN LÄMPÖVARASTOJEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖN TUOTANNOSSA KAASUTURBIINIPROSESSISSA 9
4.1 Rankine-työkierto 9
4.2 Stirling-kierto 10
4.3 Brayton-kierto 10
4.4. Ericsson-prosessi 13
5. LÄMPÖAKKUJEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖN JA KAUKOLÄMMÖN YHTEISTUOTANNOSSA 15
5.1 Sähkö- ja lämpömarkkinat 15
5.2 Erilaisia teknisiä toteutuksia 16
5.3 Suuren mittakaavan koelaitos 20
6. YHTEENVETO 22
LÄHTEET 23

LYHENTEET JA MERKINNÄT.

CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
HT-TES	*High Temperature Thermal Energy Storage, korkean lämpötilan lämpövarasto*
η	Hyötysuhde
W	Työ
Q	Lämpö
T	Lämpötila
Π	Painesuhde, kompressorin ulostulopaineen ja sisäänmenopaineen suhde
γ	Adiabaattivakio
C^*_{pm}	Keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi energiajärjestelmiä on alettu muuttaa entistä vähäpäästöisemmiksi ja uusiutuvien energialähteiden, etenkin tuuli- ja aurinkovoiman, osuus energiantuotannossa kasvaa nopeasti. Samalla kuitenkin realisoituu näiden tuotantomuotojen merkittävä haaste: tuotannon epävakaus ja riippuvuus sääolosuhteista. Sähköverkossa kulutuksen ja tuotannon tulee olla koko ajan tasapainossa ja uusiutuvan energian lisääntyessä syntyy yhä useammin tilanteita, joissa tuotanto ja kulutus eivät vastaa toisiaan. Tästä syystä energian varastoinnista on tullut keskeinen osa tulevaisuuden energiaratkaisuja.

Perinteiset sähköenergian varastointimenetelmät, kuten akut ja pumppuvoimalaitokset, soveltuvat moniin käyttötarkoituksiin, mutta niillä on myös rajoitteensa, merkittävimpinä esimerkiksi pieni energiatiheys tai lyhyt käyttöikä. Termisen energian eli lämpöenergian varastointi tarjoaa vaihtoehtoisen ja tehokkaan ratkaisun energian varastointiin, etenkin tilanteissa, joissa lämpöä voidaan hyödyntää suoraan tai muuntaa sähköksi korkean hyötysuhteen prosesseilla. Korkean lämpötilan lämpövarastot (High Temperature Thermal Energy Storage, HT-TES) mahdollistavat energian tehokkaan varastoinnin ja sen hyödyntämisen esimerkiksi sähköntuotannossa kaasuturbiiniprosessin avulla.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään korkean lämpötilan lämpövarastojen hyödyntämiseen sähkö- ja lämpöenergian varastoinnissa. Työssä käsitellään sekä tuntuvan että latentin lämmön varastointitekniikoita, tarkastellaan niiden soveltuvuutta energiantuotantoon ja vertaillaan erilaisia lämpövoimakoneita, kuten Brayton- ja Rankine-kiertoja, lämpöenergian muuntamisessa sähköksi. Erityinen painopiste on siinä, miten lämpövarastoja voidaan käyttää tehokkaasti osana yhteistuotantojärjestelmiä (CHP) sekä sähkön että lämmön tuottamiseen.

Työssä hyödynnetään alan kirjallisuutta ja mallinnuksia, joilla arvioidaan erilaisten lämpövarastointimenetelmien hyötysuhteita ja taloudellista kannattavuutta. Lopuksi esitetään esimerkkejä olemassa olevista tai suunnitteilla olevista koelaitoksista, joissa korkean lämpötilan lämpövarastoja on hyödynnetty menestyksekkäästi. Tulosten perusteella pohditaan, millaisia mahdollisuuksia lämpöakkujen laajamittainen käyttöönotto tarjoaa uusiutuviin energialähteisiin perustuvissa energiajärjestelmissä.

2. ENERGIAN VARASTOINTI

Energian varastoinnilla tarkoitetaan järjestelyä, jossa jollain hetkellä tuotettu energia voidaan myöhemmin ottaa helposti käyttöön halutulla teholla.

Energian varastoiminen voidaan jakaa viiteen osa-alueeseen; mekaaniseen, sähkökemialliseen, kemialliseen, sähkömagneettiseen sekä termiseen energian varastointiin. (Zhao et al., 2015). Tässä työssä keskitytään pääasiallisesti termiseen energian varastointiin.

Uusiutuvien energialähteiden ja energiantuotantomuotojen osuus sähköntuotannosta on viime vuosikymmenen aikana kasvanut merkittävästi, ja esimerkiksi Suomessa uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta on Työ- ja elinkeinoministeriön mukaan yli 40 % (“Uusiutuva energia - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu,” n.d.). Uusiutuvan energian, etenkin voimakkaasti lisääntyvien aurinko- ja tuulivoiman tuotanto on kuitenkin hyvin vaihtelevaa, sillä ne ovat säästä riippuvaisia. Tämä aiheuttaa rajujen hintavaihtelujen lisäksi ongelmia esimerkiksi sähköverkon taajuuden ylläpitämiseen. Näitä vaihteluita voidaan tasata varastoimalla energiaa ylijäämätuotannon aikaan ja purkamalla sitä varastoista tarpeen mukaan (Stevanovic and Rembold, 2016).

2.1 Sähköenergian varastointi

Sähköenergian varastointia pidetään energianvarastoinnin korkeimpana muotona, sillä termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan systeemin entropia pyrkii kasvamaan, jonka seurauksena lämpöenergiaa ei voida muuttaa kokonaan työksi, mutta työ voidaan muuttaa kokonaan lämmöksi. Sähköenergiaa sen sijaan voidaan muuttaa lämmöksi helposti (Stevanovic and Rembold, 2016).

Varastot voidaan jakaa myös varastointiajan mukaan. Jotkut tekniikat soveltuvat paremmin lyhytaikaiseen, muutamien tuntien varastointiin, ja jotkut tarjoavat mahdollisuuden pidempiaikaiseen varastointiin, jopa vuosiksi.

Sähköenergian varastointiin on tarjolla useita vakiintuneita tekniikoita, joissa kaikissa on hyvät ja huonot puolensa. Tekniikat soveltuvatkin eri käyttökohteisiin ja käyttötarkoituksiin. Tässä työssä esitellään vain muutamia eri tekniikoita.

2.1.1 Akut

Akku on laite, joka varastoi sähköenergiaa kemialliseksi energiaksi. Akkuja on käytössä laajalti esimerkiksi ajoneuvoissa sekä älylaitteissa. Niitä käytetään myös verkon taajuuden säätämisessä sekä uusiutuvan energian tuotannonvaihteluiden tasaamisessa erityisesti kotitalouksissa. Niillä on suhteellisen hyvä energiatiheys ja niitä on saatavina monessa eri koossa ja kapasiteetissa. Akuista saadaan hyvin suuria hetkellisiä tehoja, joten niitä voidaan käyttää sähköverkkojen toiminnan takaamiseen. Niitä voidaan valmistaa kymmenillä eri tekniikoilla, mutta nykyään yleisimpiä ovat litium-ioniakut, joilla on hyvä käyttöikä, hyvä hyötysuhde ja suuri energiatiheys.

Akkujen huonoja puolia ovat niiden kallis hinta, lyhyt käyttöikä, turvallisuus sekä valmistukseen vaadittavien harvinaisten metallien määrä. Akkuteknologia on kuitenkin kehittynyt hyvin nopeasti ja lupaavia uusia kokeiluja tehdään koko ajan (Hoff, 2022).

2.1.2 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoimalaitoksissa energiaa varastoidaan veden potentiaalienergiaksi. Halvan sähkön aikaan vettä pumpataan alemmasta altaasta ylempään, ja kun energiaa halutaan vapauttaa varastosta, ohjataan vesi ylemmästä altaasta turbiinin läpi alempaan altaaseen. Tekniikka on yksinkertaista ja ensimmäiset laitokset rakennettiin jo yli sata vuotta sitten. Noin 95 prosenttia sähköenergian varastointikapasiteetista on pumppuvoimaloita (Hoff, 2022).

Pumppuvoimaloiden etuja ovat pitkä käyttöikä, luotettavuus, kyky varastoida energiaa jopa vuosiksi, hyvä säädettävyys ja hyvä, jopa yli 80 prosentin kokonaishyötysuhde. Pumppuvoimalat kuitenkin vaativat paljon tilaa sekä sopivan maaston, jossa on satojen metrien korkeusero. Pumppuvoimaloiden rakentaminen häiritsee ja tuhoaa ympäristöä, sillä ne vaativat suuria altaita veden säilyttämiseen, ja niissä liikutetaan suuria määriä vettä joko luonnollisiin järviin tai tekojärviin (Hoff, 2022).

2.1.3 Vauhtipyörät

Vauhtipyörissä energiaa varastoidaan kineettisenä energiana pyörimisliikkeen avulla. Vauhtipyörään varastoitunut energia riippuu vauhtipyörän muodosta, massasta sekä pyörimisnopeudesta. Varastoitunut energia kasvaa pyörimisnopeuden neliönä. Tämän takia vauhtipyörät pyörivät usein todella nopeasti, jolloin niihin kohdistuu kovia voimia. Sen seurauksena ne tehdään usein erittäin kestävistä materiaaleista, kuten hiilikuidusta.

Toinen vaihtoehto on tehdä vauhtipyörästä hitaammin pyörivä, mutta painavampi. Tekniikka on yksinkertaisempaa, mutta energiatiheys on matalampi. Vauhtipyörävarastojen energiatiheys on vain noin 13-16 Wh/l (Hoff, 2022), kun taas esimerkiksi yleisesti käytössä olevan 18650-akkukennon energiatiheys on lähes 700(693) Wh/l **(Panasonic)**. Vauhtipyörävarastot toimivat usein alipaineessa, sillä ilmanvastus jarruttaa pyörivää massaa koko ajan. Vauhtipyörissä käytetään myös usein magneettilaakereita, koska mekaaniset laakerit aiheuttavat kitkahäviöitä eivätkä välttämättä sovellu suuremmille pyörintänopeuksille. Alipainepumput ja sähkömagneettiset laakerit vievät sähköä, ja vauhtipyörän energiasta niihin menee noin 3 -10 prosenttia tunnissa.

Vauhtipyöristä saadaan kuitenkin suuria hetkellisiä tehoja, ja niitä käytetään usein taajuuden säätelyyn ja nopeiden kuormien tasaamiseen. Vauhtipyörien etuna on niiden pitkäikäisyys, sillä ne eivät käyttöikänsä aikana menetä kapasiteettiaan tai tehojaan. Vauhtipyörät myös kestävät lämpötilojen vaihteluja esimerkiksi akkuja paremmin. Vauhtipyörien valmistuksessa ei tarvita juurikaan harvinaisia raaka-aineita, joten niitä pidetään ympäristöystävällisinä (Hoff, 2022).

2.2 Lämpöenergian varastointi

Lämpöenergian varastointia on tutkittu kauan ja käytössä on useita vakiintuneita menetelmiä. Lämpöenergiaa varastoidaan varastointimateriaaliin, jota lämmitetään tai viilennetään. Varastoitunutta energia voidaan myöhemmin käyttää lämmitykseen, viilennykseen tai sähköenergian tuotantoon.

Lämpöenergian varastointi voi parantaa energiajärjestelmien kokonaishyötysuhdetta ja luotettavuutta ja se voi olla taloudellisesti järkevää sekä vähentää hiilidioksidipäästöjä. Lämpöenergian varastointitekniikoita on laajasti käytössä esimerkiksi kaukolämmön varastoinnissa, jolloin kulutushuippuja saadaan tasattua kaukolämpöakun avulla (Sarbu and Sebarchievici, 2018).

Lämpöenergian varastointimateriaali määritetään käyttökohteen mukaan. Materiaalilla tulisi olla suuri lämmönjohtavuus sekä energiatiheys. Materiaalivalintaan vaikuttaa myös käytössä oleva tekniikka sekä lämpötilatasot. Erilaisia tekniikoita ovat tunnetun lämmön varastointi, latentin lämmön varastointi sekä termokemiallisen lämmön varastointi. Käyttökohde voi määrittää materiaalille myös muita vaatimuksia, joita voivat olla muun muassa vaatimus lämpötilatasosta, ympäristöystävällisyydestä, hinnasta tai energiatiheydestä. (Tian and Zhao, 2013).

Kuten aiemmin on todettu, lämpö on alhaisin energian muoto, sillä sen muuttaminen sähköksi hyvällä hyötysuhteella on vaikeaa. Lämpövaraston lämpötila kuitenkin vaikuttaa siihen, millaisella hyötysuhteella konversio voidaan tehdä. Esimerkiksi 2000 °C lämpöä voidaan muuttaa lämmöksi hyötysuhteella n = 0.87, mutta 100 °C vain hyötysuhteella n = 0.2. Tätä hyötysuhdetta kutsutaan lämmön laatuindeksiksi (Stevanovic and Rembold, 2016).

Lämpöä varastoidaankin yleensä lämmön tarpeen takia, ei sähkön tuottamiseksi. Tässä työssä kuitenkin keskitytään lämmön varastointiin sähkön tuottamiseksi, erityisesti korkean lämpötilan lämpövarastoihin.

3. KORKEAN LÄMPÖTILAN LÄMPÖVARASTOT

Carnot'n teoreeman mukaan lämpövoimakoneen potentiaalinen hyötysuhde kasvaa siihen tuodun lämmön lämpötilan noustessa (Holy et al., 2021). Tämän vuoksi lämmön varastoiminen sähköenergian tuotantoa varten kannattaa toteuttaa mahdollisimman korkeassa lämpötilassa. Korkea lämpötilaero kuitenkin lisää häviöitä ympäristöön. Korkean lämpötilan lämpövarastoista puhutaan yleisesti, kun lämpötila on yli 300 astetta.

3.1 Tuntuvan lämmön varastointi

Tuntuvan lämmön varastossa lämpöenergiaa sidotaan varastoaineeseen lämmittämällä tai viilentämällä sitä. Varastomateriaali ei tuntuvan lämmön varastoinnissa muuta olomuotoaan. Tuntuvan lämmön varastointi on yleisin käytössä oleva lämmönvarastointitekniikka. Esimerkiksi lämminvesivaraaja sekä kaukolämpöakut ovat tuntuvan lämmön lämpövarastoja. Varastoidun energian määrä on verrannollinen lämpötilan muutokseen ja materiaalin lämpökapasiteettiin(IRENA, n.d.).

Lämpövarastojen materiaalit voidaan jakaa kiinteisiin ja nestemäisiin aineisiin. Yleisimpiä varastointiaineita ovat vesi, suolaliuokset sekä kivimateriaali. Materiaalin ominaisuuksista ominaislämpökapasiteetti, lämmönjohtavuus ja tiheys ovat tärkeimpiä. Näiden ominaisuuksien lisäksi hinta, saatavuus, ympäristöystävällisyys ja vakaat kemialliset ominaisuudet ovat tärkeitä (Li, 2016).

Eräs tärkeä materiaalivalintaan vaikuttava ominaisuus on myös materiaalin käyttölämpötila. Joitain materiaaleja voidaan käyttää hyvin laajalla lämpötila-alueella, mutta esimerkiksi suurin osa nesteistä toimii vain alhaisissa, alle 150 asteen lämpötiloissa. Tämä johtuu esimerkiksi veden kohdalla siitä, että se alkaa normaalissa ilmanpaineessa kiehumaan sadan asteen lämpötilassa. Kiehumispistettä on mahdollista nostaa nostamalla järjestelmässä olevaa painetta, kuten esimerkiksi kaukolämpöverkossa tehdään, mutta paineenhallintajärjestelmät ovat kalliita ja monimutkaisia. Lisäksi järjestelmän materiaalivaatimukset ja -paksuudet kasvavat huomattavasti. Yleisesti ottaen kiinteillä aineilla on laajempi toiminta-alue ja suurempi tiheys, mutta alhaisempi ominaislämpökapasiteetti(Sharma et al., 2009). Taulukossa 1 esitetään joidenkin varastointimateriaalien ominaisuuksia.

AINE	OLOMUOTO	TOIMINTALÄMPÖTILA	TIHEYS (KG / DM^3)	OMINAISLÄMPÖKA-PASITEETTI (J / KG K)
KALLIO	Kiinteä	20	2560	879
TIILI	Kiinteä	20	1600	840
BETONI	Kiinteä	20	1900-2300	880
RAUTA	Kiinteä	120-1400	7850	460
VESI	Neste	0-100	1000	4190
CALORIA HT43	Öljy	12-260	867	2200
MOOT-TORIÖLJY	Öljy	<160	888	1880
ETANOLI	Orgaaninen neste	<78	790	2400
PRO-PANOLI	Orgaaninen neste	<97	800	2500
ISOPEN-TANOLI	Orgaaninen neste	<148	831	2200

Taulukko 1: Tuntuvan lämmön varastoon sopivien varastointimateriaalien ominaisuuksia(Muokattu Sharma et al., 2009)

Taulukosta on jätetty pois joitain orgaanisia nesteitä, sillä ne eivät olleet tämän työn kannalta mielenkiintoisia. Kivelle, tiilelle tai betonille ei taulukossa ole annettu lämpötilan ylärajaa, mutta se on kullekin aineelle koostumuksesta riippuen hieman yli 1000 astetta(“Metamorphic rock - Pressure, Temperature, & Deformation | Britannica,” n.d.).

Taulukosta voidaan huomata, että kaikkien nesteiden toimintalämpötila jää tämän työn kannalta liian alhaiseksi.

3.2 Latentin lämmön varastointi

Lämpöenergiaa varastoidessa voidaan hyödyntää myös materiaalien olomuodon muutosta. Tätä tekniikkaa kutsutaan latentin lämmön varastoksi tai faasinmuutoslämmön varastoksi. Lämmön varastointiaineella on kyky varastoida tai sitoa energiaa olomuodon muutoksessa. Yleensä suurin osa lämmöstä varastoidaan nimenomaan faasinmuutokseen, jolloin lämpövaraston lämpötila pysyy melko vakiona (Sarbu and Sebarchievici, 2018).

Yleisimmin latentin lämmön varatoissa hyödynnetään olomuodon muutosta kiinteästä nesteeksi tai toisin päin. Tässä faasinmuutoksessa tilavuus kasvaa tyypillisesti alle 10 %, joka helpottaa varaston suunnittelua. Esimerkiksi nesteestä kaasuksi muuttuessaan aineen tilavuus kasvaa huomattavasti enemmän, jolloin varaston tekeminen on monimutkaisempaa. Lisäksi se vaatii kalliita paineenhallintajärjestelmiä(Sharma et al., 2009).

Latentin lämmön varastoiden etuna on kahdesta kymmeneen kertaa tuntuvan lämmön varastoja parempi energiatiheys ja lämpötila-alueen pysyminen faasinmuutoksesta johtuen melko vakiona. Huonoina puolina voidaan mainita rajoitetumpi lämpötila-alue, varastointimateriaalin mahdollinen myrkyllisyys sekä varastointimateriaalin huonosta lämmönjohtokyvystä johtuva huipputehon rajallisuus(Reddy et al., 2018).

Latentin lämmön varastoissa käytetään niin sanottuja faasinmuutosmateriaaleja. Ne voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan; orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin. Materiaali valitaan käyttökohteen mukaan, vaikuttavia tekijöitä siihen ovat muun muassa hinta, lämpötila-alue sekä myrkyllisyys. (Reddy et al., 2018) mainitsee tutkimuksessaan faasinmuutosmateriaalille tärkeitä ominaisuuksia seuraavasti:

- Korkea tiheys, latentti sulamislämpö ja ominaislämpökapasiteetti
- Hyvä lämmönjohtokyky
- Pieni tilavuuden muutos faasin muuttuessa
- Vakaat kemialliset ominaisuudet
- Ei aiheuta korroosiota
- Myrkytön ja ympäristölle turvallinen
- Edullinen ja helposti saatavilla oleva

Orgaaniset materiaalit voidaan jakaa vielä kahteen ryhmään, parafiinisiin ja ei-parafiinisiin. Orgaanisten materiaalien sulamislämpö ei faasinmuutostilanteessa heikkene. Faasinmuutoksessa ei tapahdu molekyylisidosten katkeamista, eli uusia yhdisteitä ei synny. Orgaanisilla aineilla on myös matala korroosioaste (Sharma et al., 2009).

Epäorgaaniset materiaalit, eli suolot, suolahydraatit, hydroksidit ja metalliseokset ovat suosittuja latentin lämpöenergian varastoinnissa. Niiden ominaisuuksia on korkea ominaissulamislämpö, korkea lämmönjohtavuus ja vähäinen tilavuuden muutos faasin muuttuessa. Niiden haasteina on kuitenkin korkea korroosioaste ja joskus korkea hinta. (Sharma et al., 2009).

Eutektiset materiaalit koostuvat kahdesta tai useammasta mahdollisimman alhaisen sulamispisteen yhdisteestä, jolloin kaikki niistä muuttavat faasiaan yhtenäisesti, muodostaen kiteitä (Sharma et al., 2009). Eutektisten yhdisteiden käyttö on kuitenkin vielä uutta, ja niitä ei juuri ole käytössä. Eutektiset materiaalit voivat kuitenkin olla muita vastaavia aineita halvempia, sillä niiden yksi komponentti on usein vesi.

4. KORKEAN LÄMPÖTILAN LÄMPÖVARASTOJEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖN TUOTANNOSSA KAASUTURBIINIPROSESSISSA

Jotta lämpövarastossa olevaa lämpöenergiaa voidaan hyödyntää sähköntuotannossa, tarvitaan lämpövoimakonetta. Lämpövoimakone muuttaa osan lämpöenergiasta mekaaniseksi energiaksi. Lämpövoimakoneita on erilaisia, ja niitä on helpoin kuvata teoreettisina työkiertoina. Malleja voidaan tarkentaa reaalimaailmasta saadun mittausdatan perusteella. Lämpövoimakoneita on käytössä paljon, esimerkiksi liikenteessä ja energiantuotannossa. Yleisimpiä lämpövoimakoneita ovat moottorit, turbiinit ja höyrykoneet. Teoreettisia työkiertoja ovat muun muassa Otto, Rankine, Carnot, Stirling, Brayton ja Ericcson.(Johnson, n.d.)

Termodynamiikan lait rajoittavat lämpövoimakoneiden hyötysuhdetta. Carnot'n teoreemaa määrittelee kahden lämpövaraston välillä toimivan lämpövoimakoneen maksimaalisen, teoreettisen hyötysuhteen, Carnot'n hyötysuhteen. Kaavassa η on hyötysuhde, W on tuotettu työ, Qh on kuumasta lämpövarastosta siirtyvä lämpö, $T_{kylmä}$ on kylmän lämpövaraston lämpötila ja T_{kuuma} kuuman lämpövaraston lämpötila.

$$\eta = \frac{W}{Qh} = 1 - \frac{T_{kylmä}}{T_{kuuma}}$$

Kaava 1: Carnot'n hyötysuhde.

Carnot'n lämpövoimakone on ideaali, eli se on reversiibeli eikä lisää entropiaa. Sen kierron vaiheiden oletetaan olevan isotermisiä ja adiabaattisia.

4.1 Rankine-työkierto

Rankine-kierto on ideali termodynaaminen kierto, joka kuvaa monen lämpövoimakoneen, kuten turbiinin toimintaa. Rankine-kierrossa systeemiin tuodaan lämpöä, ja kiertoaine höyrystetään. Höyry pyörittää turbiinia, jolloin osa kiertoaineen energiasta muuttuu mekaaniseksi työksi. Sen jälkeen se lauhdutetaan takaisin nesteeksi. Kiertoaineena käytetään yleensä vettä. (AR, 2021)

Rankine-prosessissa kiertoaine muuttaa olomuotoaan kierron aikana. Lämpöä poistetaan lauhduttimessa, jolloin kiertoaine muuttuu nesteeksi. Paineen nostaminen kiertoaineen ollessa nestettä kuluttaa vähemmän energiaa kuin kaasufaasissa olevan aineen. Toisaalta myös kiertoaineen höyrystymiseen vaaditaan tietty höyrystymislämpö.

Carnot'n teoreemaa mukaillen myös rankine-kierron hyötysuhde riippuu lämmönlähteiden välisistä lämpötilaeroista. Mitä suurempi erotus niiden välillä on, sitä tehokkaammin lämpöä voidaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi. Käytännössä alempi lämpötila ohjautuu ympäristön lämpötilan mukaan, ja ylempää lämpötilaa rajoittaa usein materiaalien kestävyys.

Monet nykyaikaiset voimalaitokset pohjautuvat rankine-kiertoon. Niihin on kuitenkin tehty erilaisia hyötysuhdetta parantavia muutoksia, kuten esilämmityksiä ja väliottoja.

4.2 Stirling-kierto

Stirling-moottori, jonka toimintaa stirling-kierto kuvaa, keksittiin vuonna 1816. Stirling-prosessi koostuu neljästä osaprosessista: isotermisestä paisunnasta, isokoorisesta lämmöntuonnista, isotermisestä puristuksesta ja isokoorisesta lämmönpoistosta. Stirling-kierron teoreettinen maksimihyötysuhde on Carnot-hyötysuhde. Samoilla lämmönlähteillä molempien kiertojen hyötysuhde on sama. (Jarva and Niskanen, n.d.)

Stirling-moottorissa työkaasua ei lisätä tai poisteta, vaan lämpö tuodaan ulkopuolelta. Työkaasuna käytetään usein vetyä tai heliumia, ja nykyaikaisissa Stirling-moottoreissa työkaasu on usein paineistettu, sillä se nostaa moottorin tehoa.

Prosessiin tuodaan lämpö ulkopuolelta, jolloin lämmönlähteenä voidaan käyttää lähes mitä tahansa. Paras hyötysuhde saavutetaan korkeilla, yli tuhannen asteen lämpötiloilla, mutta Stirling-moottori on mahdollista saada toimimaan jo noin 200 asteen lämmössä. Vaikka Stirling-moottori on vanha keksintö, on sille yksinkertaisuutensa ja joustavuutensa vuoksi käyttökohteita myös nykyään. Moottoria tutkitaan ja kehitetään edelleen jatkuvasti. (Douadi et al., 2022)

4.3 Brayton-kierto

Brayton-kierto on ideaali kiertoprosessi, joka kuvaa esimerkiksi kaasuturbiinin toimintaa. Sekin koostuu neljästä vaiheesta: isentrooppisesta puristuksesta, isobaarisesta lämmöntuonnista, isentrooppisesta paisunnasta ja isobaarisesta lämmönpoistosta. Vaikka ensimmäiset Brayton-moottorit olivat mäntämoottoreita, ovat nykyiset Brayton-prosessiin pohjautuvat moottorit käytännössä aina kaasuturbiineja.

Ideaalin Brayton-kierron hyötysuhde voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

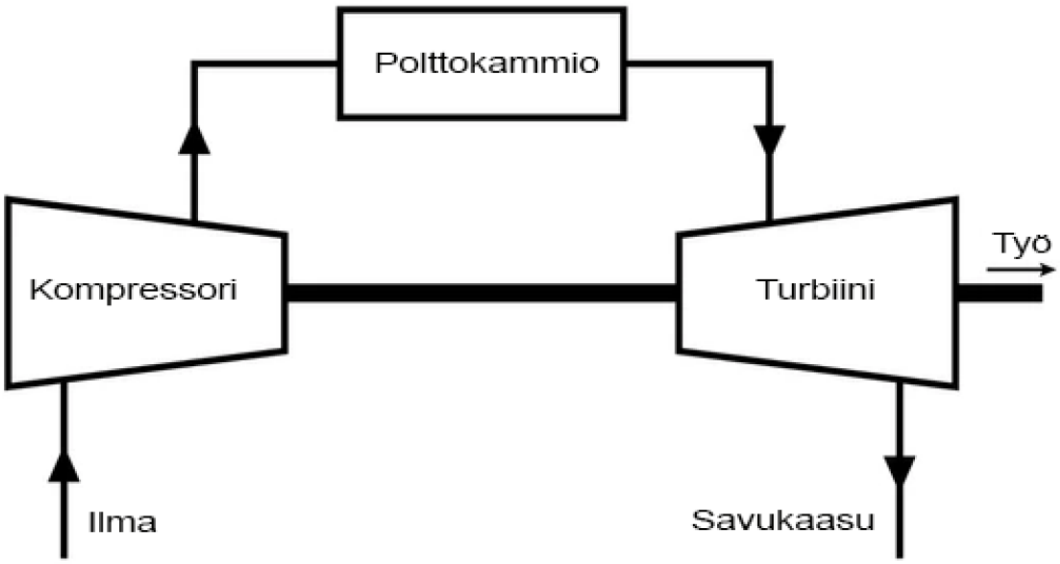
$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\Pi^{1/C^*_{pm}}} = 1 - \Pi^{1-\gamma/\gamma}$$

Kaava 2: Brayton-kierron hyötysuhde

jossa Π kuvaa painesuhdetta, γ on abiabaattivakio ja C^*_{pm} on keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti. Hyötysuhde on siis Carnot'n hyötysuhdetta huonompi. ("3.7 Brayton Cycle," n.d.)

Kuten muissakin moottoreissa, materiaalien kestävyys rajoittaa reaalimaailmassa käytettäviä maksimilämpötiloja. Kompressorin sisäänmenolämpötila on yleensä ympäristön lämpötila. Brayton-kierron hyötysuhdetta saadaan parannettua nostamalla painesuhdetta, eli kompressorin sisäänmenopaineen ja ulostulopaineen suhdetta. Taloudelliset syyt kuitenkin rajaavat korkeimman käytetyn painesuhteen yleensä välille 11-16.

Kaasuturbiini koostuu vähintään kolmesta pääkomponentista, eli kompressorista, polttokammiosta tai lämmönsiirtimestä ja turbiinista. Nämä komponentit on esitetty kuvassa 1. Kaasuturbiinien etuja energiantuotannossa on niiden yksinkertaisuus, skaalattavuus, luotettavuus ja mahdollisuus nopeaan säätöön. ("3.7 Brayton Cycle," n.d.)



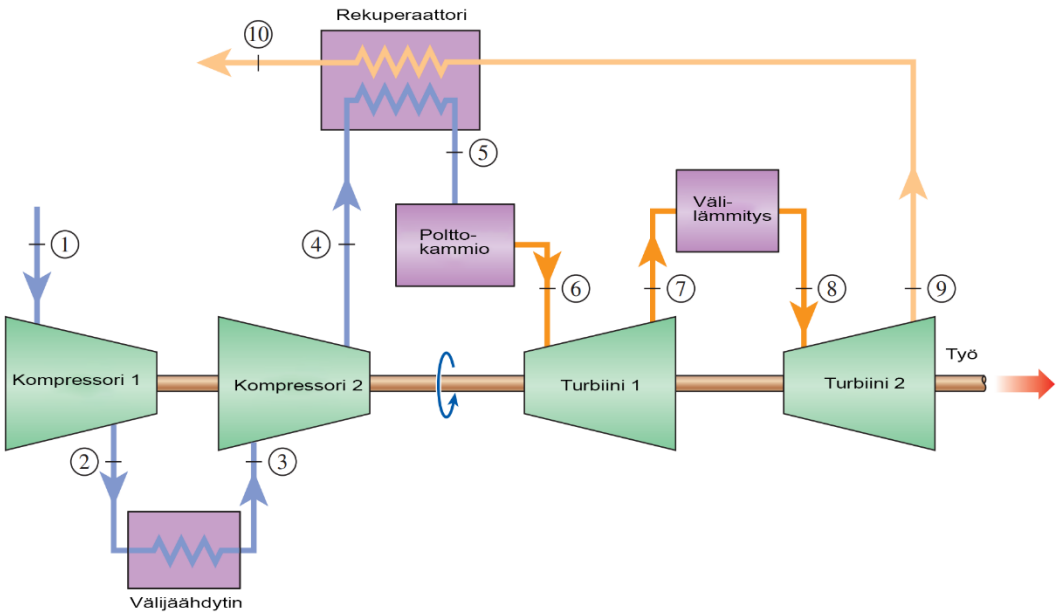
Kuva 1: Avoin Brayton-prosessi ilman rekuperaattoria tai välijäähdytystä. (shutterstock.com, muokattu)

Vaikka ideaali Brayton-prosessi on suljettu, toteutetaan Brayton-kiertoa usein avoimena kaasuturbiiniprosessina, jossa kiertoaine vaihtuu koko ajan. Kiertoaineena käytetty ilma otetaan ulkoa, ja se lämpenee jonkin verran kompressorissa. Polttokammiossa ilmaan

syötetään polttoainetta, ja muodostuva, kuuma savukaasun ja ilman seos, ohjataan turbiiniin. Turbiini on yleensä kytketty samalle akselille kompressorin kanssa, ja suuri osa työstä meneekin kompressorin pyörittämiseen. Kompressorin vaatimaa työtä voidaan vähentää välijäähdytyksellä, jolloin kompressori jaetaan useampiin vaiheisiin, joiden välillä poistetaan lämpöä esimerkiksi kaukolämpöön. Viileämpi ilma on tiheämpää, jolloin sen puristamiseen vaaditaan vähemmän työtä. Kaasuturbiinista saatava mekaaninen työ otetaan turbiinin akselilta.

Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa myös käyttämällä useampivaiheista paisuntaa välilämmityksellä eli lisäpoltolla. Lisäpoltto voidaan tehdä, koska kaasuturbiineissa käytetään tyypillisesti korkeaa ilmasuhdetta, joten savukaasuissa on vielä paljon happea.

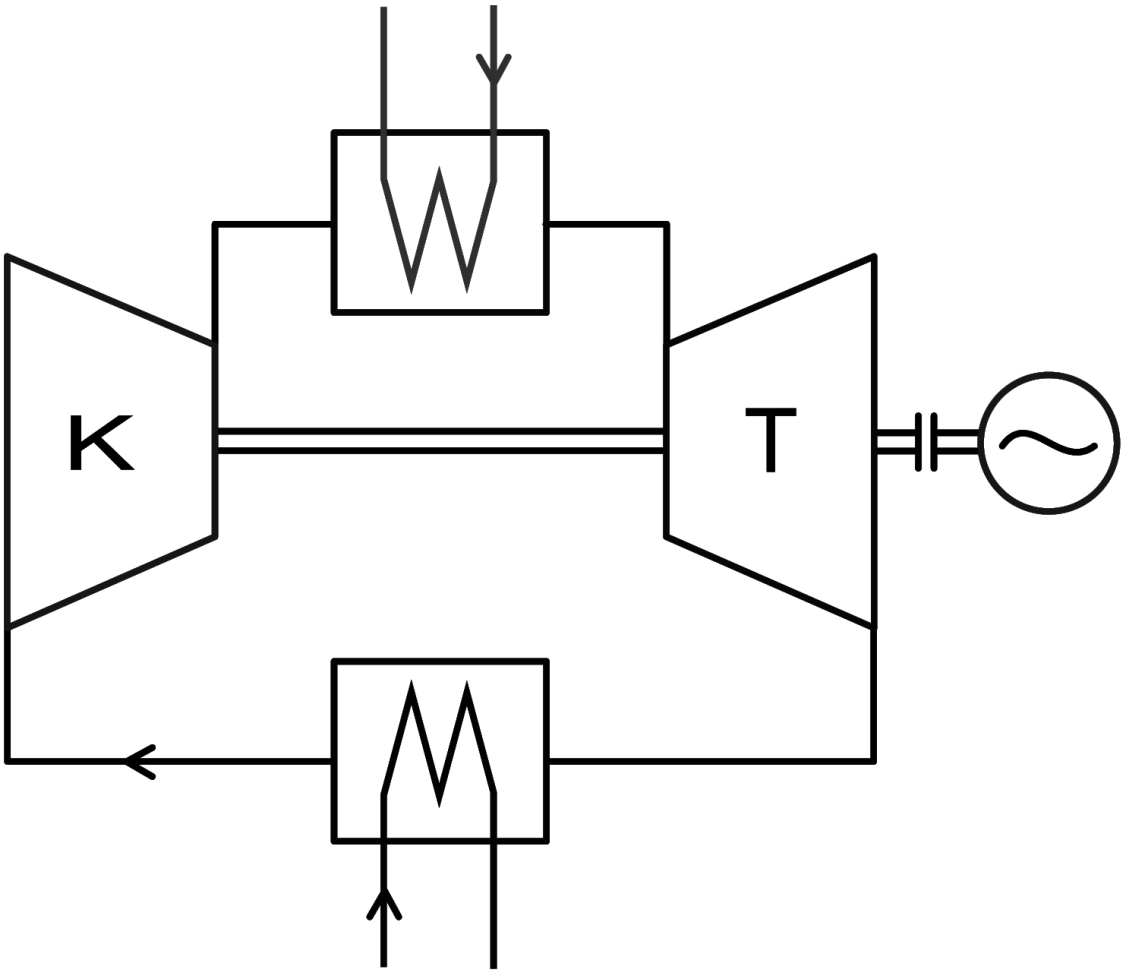
Prosessin hyötysuhdetta voidaan usein parantaa myös niin kutsutulla rekuperaattorilla, eli lämmönsiirtimellä, joka siirtää turbiinin jälkeisten savukaasujen lämpöä polttokammioon menevään, jo puristettuun ilmaan. Tämä vähentää polttoaineesta tarvittavaa lämpöenergiaa.(Çengel et al., 2019) Kuvassa 2 on esitetty rekuperaattori ja sen kytkentä.



Kuva 2: Kaasuturbiini kaksivaiheisella kompressorilla, välijäähdytyksellä, kaksivaiheisella turbiinilla, välilämmityksellä ja rekuperaattorilla. (Çengel et al., 2019, muokattu)

Suljetussa Brayton-prosessissa lämpö tuodaan prosessiin ulkopuolelta lämmönvaihtimen kautta. Tämä mahdollistaa monien erilaisten ja -laatuisten polttoaineiden käytön lisäksi myös esimerkiksi keskitetyn aurinkovoiman tai lämpövaraston käytön lämmön lähteenä. Suljetussa prosessissa kiertoainetta ei lisätä tai poisteta, vaan siihen tuodaan

ja siitä poistetaan lämpöä. Kiertoaineena käytetään usein heliumia. Prosessin perusperiaate pysyy samana. Kuvassa 3 on esitetty suljetun prosessin periaate. Suljettuja kaasuturbiineja on käytetty Euroopassa jonkin verran 1930-luvulta 1980-luvulle, mutta puhtaampien polttoaineiden yleistyessä ne vähenivät. Nykyään suljettuja kaasuturbiineja käytetään ja tutkitaan esimerkiksi ydinvoiman, aurinkovoiman ja lämpövarastojen yhteydessä. (Schleicher, 2010)



Kuva 3: Suljettu Brayton-prosessi. Lämpö tuodaan ja poistetaan lämmönvaihtimien avulla. (By Andrz9j, Malyszkz, Limulus - This image is a derivative work (see below), CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17611893, muokattu)

4.4. Ericsson-prosessi

Kaasuturbiinin hyötysuhdetta voidaan siis parantaa käyttämällä useampaa puristusvaihetta välijäähdytyksellä ja useampaa paisuntavaihetta välilämmityksellä. Kun vaiheiden lukumäärä kasvaa, lähestyy prosessi Ericcson-prosessia. Ericcson-prosessissa välivaiheiden määrä lähestyy ääretöntä, jolloin lämmön tuonti ja poistaminen on isotermistä.

Ericcson-prosessin teoreettinen hyötysuhde on sama kuin Carnot'n hyötysuhde. Ericsson-prosessi muistuttaa hyvin paljon Stirling-prosessia. (Çengel et al., 2019)

5. LÄMPÖAKKUJEN HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖN JA KAUKOLÄMMÖN YHTEISTUOTANNOSSA

Uusiutuvan energian osuus energiantuotannossa kasvaa koko ajan. Se perustuu pääasiassa tuuli- ja aurinkovoimaan. Molempien tuotanto vaihtelee suuresti lyhyelläkin aikavälillä. Ajoittain tuotantoa on reilusti enemmän kuin kulutusta, kun taas ajoittain kulutus on suurta, mutta uusiutuvat energiantuotantomuodot eivät juuri tuota. Tämä luo mahdollisuuksia energian varastoinnille; lämpöakkua voidaan ladata ylituotannon aikaan ja purkaa silloin kun energiaa tarvitaan. Oman, taloudellisen mahdollisuutensa lämpöakuilla tapahtuvaan yhteistuotantoon luo niin sanottu intraday-markkina. Intraday-markkinan tarkoituksena on tasoittaa sähkön kulutuksessa ja tuotannossa oleva epätasapaino. Sähköstä saa intraday-markkinoilla huomattavasti paremman hinnan kuin tavallisilla markkinoilla. (Arabkoohsar and Andresen, 2017a)

Tässä työssä perehdytään pääasiassa Brayton-kiertoon pohjautuviin ratkaisuihin lämpövarastojen hyödyntämisessä yhteistuotannossa. Ne ovat nopeita reagoimaan ja niiden säätö on helppoa, jolloin ne soveltuvat hyvin myös intraday-markkinoille.

5.1 Sähkö- ja lämpömarkkinat

Brayton-kiertoon pohjautuvilla ratkaisuilla voidaan päästä maksimissaan noin 40 % hyötysuhteeseen sähköntuotannon osalta. Systeemin kokonaishyötysuhdetta voidaan kuitenkin parantaa huomattavasti liittämällä se osaksi kaukolämpöverkkoa, jolloin iso osa hukkalämmöstä saadaan johdettua käyttöön. Tällä tavalla systeemin kokonaishyötysuhteeksi voidaan saada jopa yli 90 %, joka on erittäin hyvä. Tämä edellyttää kuitenkin kaukolämpöverkon olemassaoloa alueella, jonne systeemi rakennetaan.

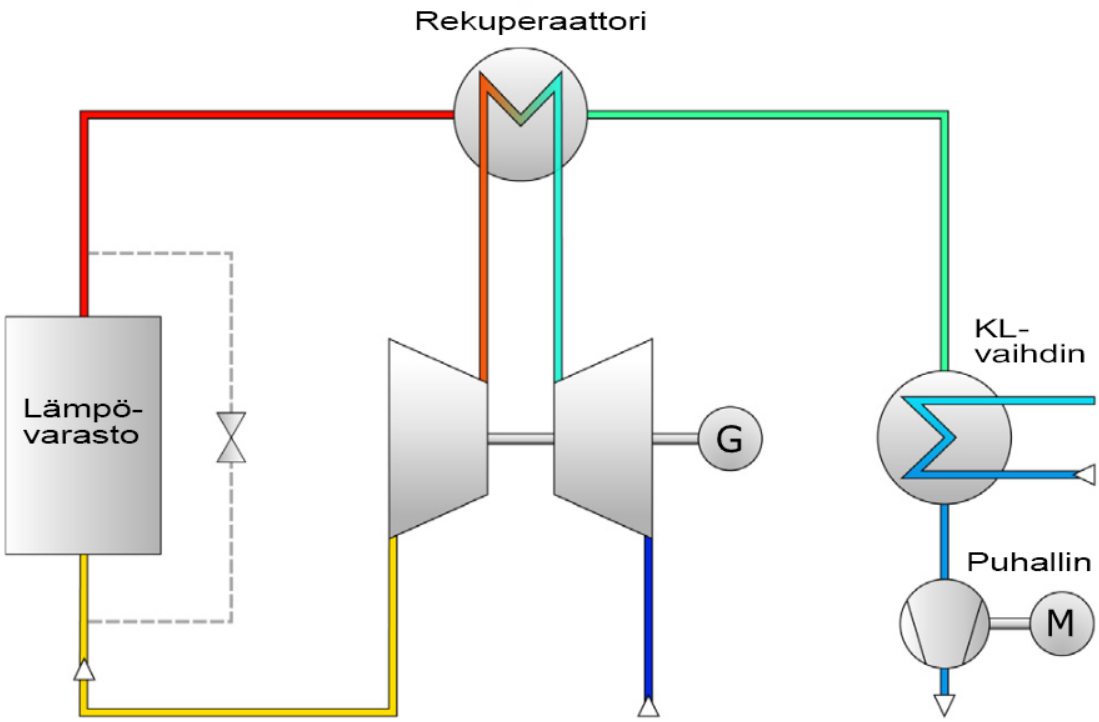
Pohjoismaissa on oma sähkömarkkinansa, pohjoismaiset sähkömarkkinat, joka koostuu Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Tanskasta ja Baltian maista. Sähköpörssi Nord Pool Spot toimii koko tällä alueella. Tässä sähköpörssissä sähkön tuottajat tarjoavat tuotantoaan seuraavalle päivälle ennen puoltapäivää niin sanotussa day-ahead -marketissa. Uusiutuvan energian tuottajien on käytettävä esimerkiksi sääennusteeseen pohjautuvaa tuotantoennustetta, ja mikäli tuotanto ei vastaa ennustetta, saattavat tuottajat saada sakkoa. Day-ahead -marketin sulkeuduttua siirrytään epätasapainoa tasapainottavaan intraday-markettiin. Lopullinen kulutuksen ja tuotannon tasapaino saavutetaan säätösähkömarkkinoilla, joita kantaverkkoyhtiöt hallinnoivat. Säätövoima on huomattavasti kalliimpaa kuin day-ahead- marketin sähkö. (Arabkoohsar and Andresen, 2017a)

Kaukolämmölle ei ole käytössä vastaavaa, laajaa pörssiä, sillä sen siirtäminen pitkiä matkoja ei ole käytännöllistä. Kaukolämmön hinta määräytyykin yleensä tuottajan eli energiayhtiön mukaan ja voi vaihdella kaupungeittain. Yleensä hinta on kiinteä ainakin lämmityskaudelle. Lämmöstä onkin tullut monelle energiantuottajalle pääasiallinen tuote. Kaukolämpömarkkinoilla tuotanto ei vaihtele yhtä paljon kuin sähkömarkkinoilla, joten tasapainottaminen on helpompaa ja erillisiä säätömarkkinoita ei ole. Lienee siis selvää, että sähköä tuottavan, lämpövarastoa hyödyntävän systeemin tulee tuottaa myös kaukolämpöä ollakseen taloudellisesti kannattava. (Arabkoohsar and Andresen, 2017a)

5.2 Erilaisia teknisiä toteutuksia

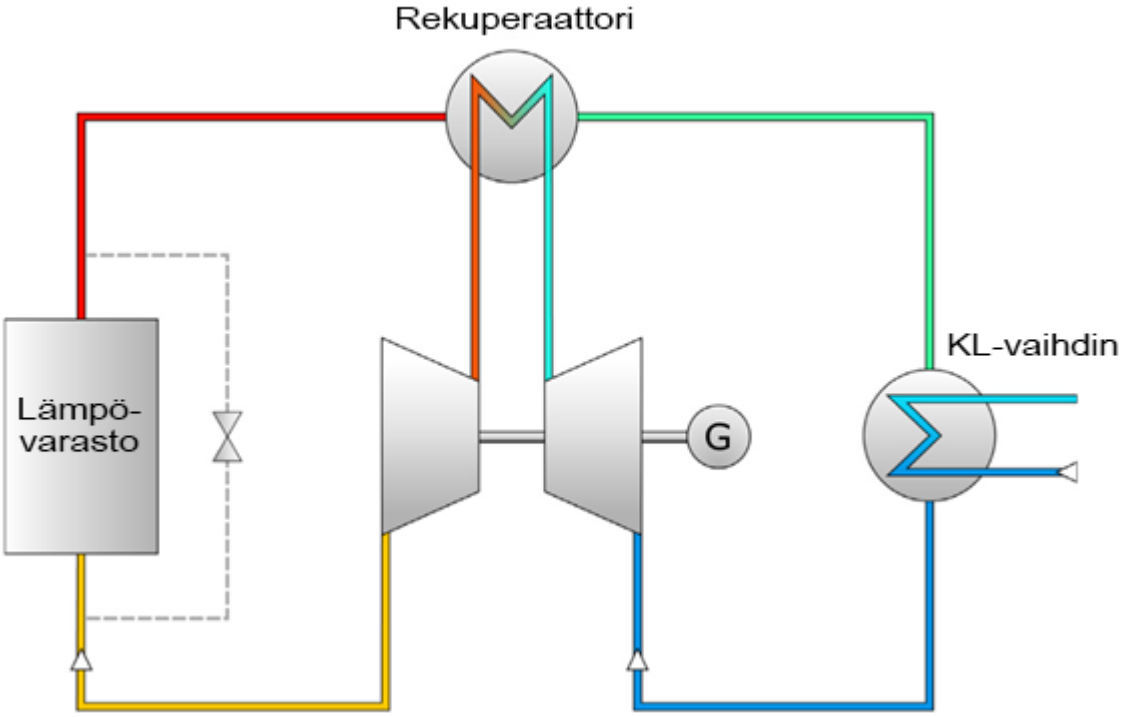
Felix Holy et al. esittelevät tutkimuksessaan neljä erilaista Brayton-kiertoon pohjautuvaa ratkaisua, joilla korkean lämpötilan lämpövarastosta voidaan tuottaa sähköä ja kaukolämpöä.

Avoin ulkoisesti lämmitetty Brayton-sykli (open externally heated Brayton cycle, OEBC) on ollut käytössä 1950-luvulta lähtien. Systeemissä lämpövarastoa ei ole paineistettu, vaan ilma ohjataan lämpövarastosta rekuperaattoriin, joka siirtää lämmön paineistettuun, turbiinille menevään ilmavirtaan. Turbiinilta tuleva ilma ohjataan suoraan lämpövarastoon, jolloin siitä saadaan lämpöenergiaa talteen. Rekuperaattorin jälkeen ylimääräinen lämpö siirretään lämmönvaihtimen avulla kaukolämpöön. Kuvassa 4 nähdään myös prosessin vaatima puhallin.



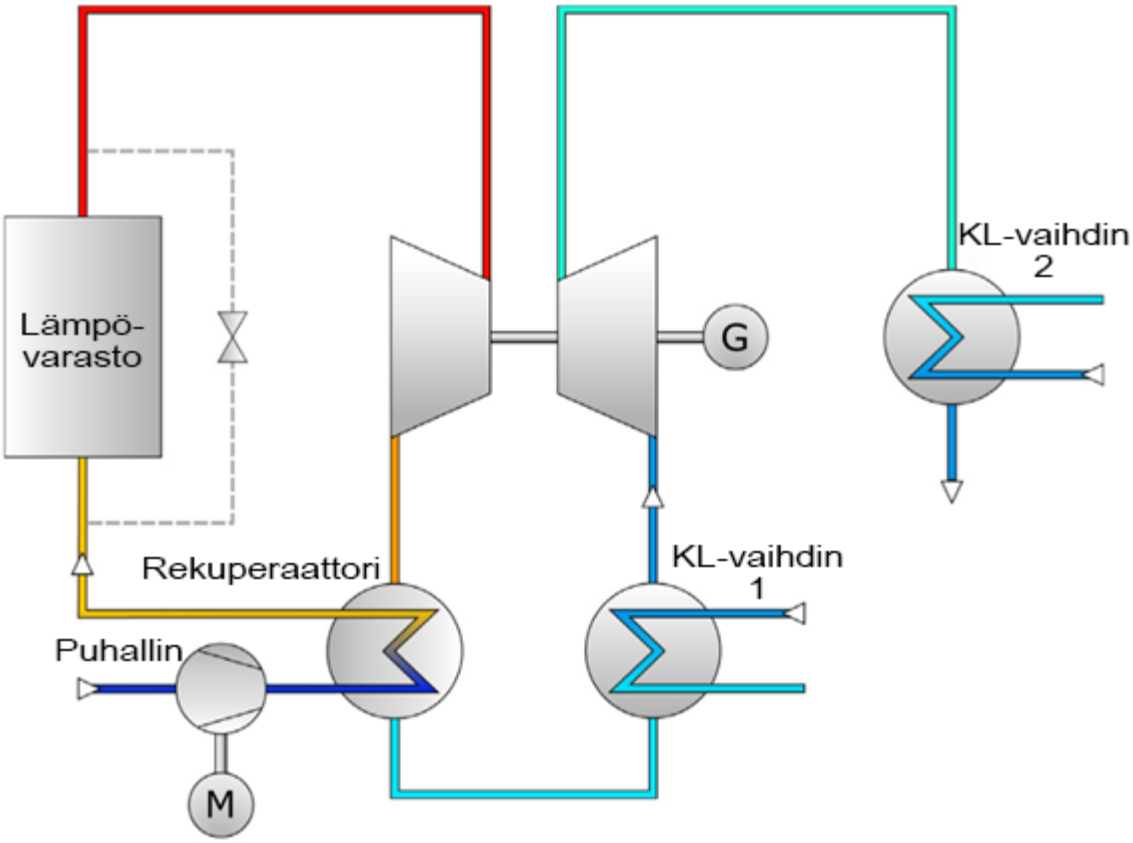
Kuva 4: Avoin ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto. (Holy et al., 2021, muokattu)

Ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto voi olla myös suljettu (closed externally heated Brayton cycle, CEBC). Tyypillisesti niillä on hieman huonompi sähköntuotannon hyötysuhde, sillä kaukolämpöverkon lämpötilasta riippuen kompressorille menevä ilma on suhteessa kuumempaa, jolloin kompressorin tekemä työ lisääntyy. Kokonaishyötysuhde sen sijaan on parempi, sillä lämpöhäviöitä ympäristöön on vähemmän. Suljetussa kierrossa kiertoainetta ei poisteta systeemistä, joten kiertoaineeksi voidaan valita esimerkiksi helium, typpi tai hiilidioksidi. (Holy et al., 2021)



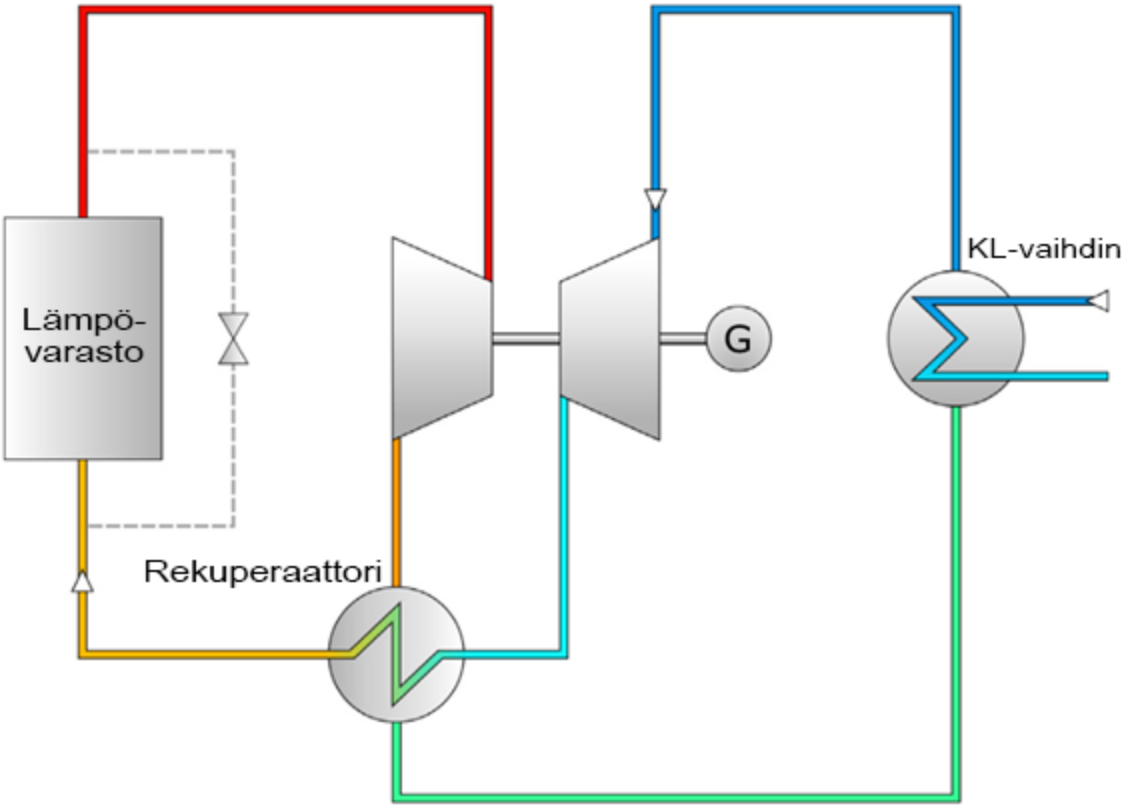
Kuva 5: Suljettu ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto. (Holy et al., 2021, muokattu)

Brayton-kierto voidaan toteuttaa myös käänteisenä. Myös sitä voidaan operoida avoimena tai suljettuna. Avoimessa käänteisessä Brayton-kierrossa turbiinin jälkeinen lämpö johdetaan rekuperaattorin avulla takaisin lämpövarastoon. Ilmaa viilennetään vielä kaukolämmönvaihtimella, jolloin kompressorityötä saadaan vähennettyä. Avoin käänteinen ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto (open inverse Brayton cycle, OIBC) on vasta tutkimusasteella, tosin pieniä koelaitteistoja on olemassa.



Kuva 6: Avoin käänteinen ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto. (Holy et al., 2021, muokattu)

Myös suljetusta käänteisestä Brayton-prosessista on tutkimuksia sekä pieniä koelaitoksia. Sen kokonaishyötysuhde näyttäisi olevan erittäin hyvä. Se tarvitsee kuitenkin laajempia tutkimuksia.

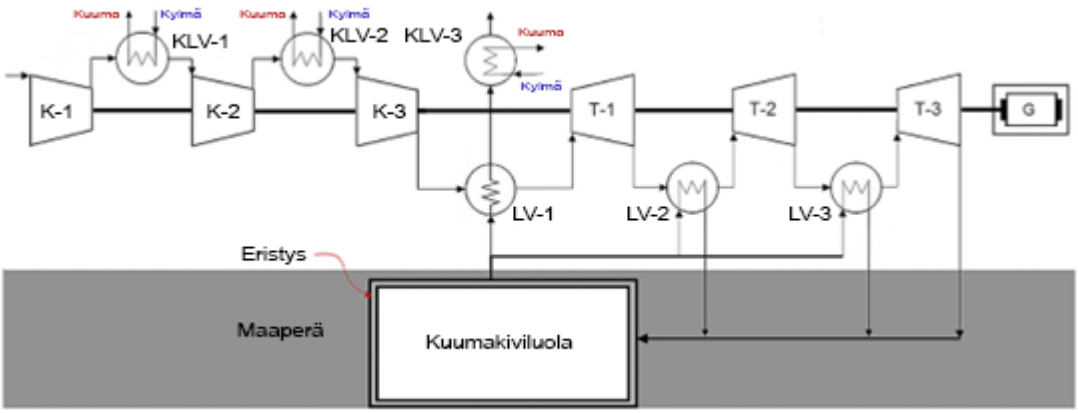


Kuva 7: Suljettu käänteinen ulkoisesti lämmitetty Brayton-kierto. (Holy et al., 2021, muokattu)

5.3 Suuren mittakaavan koelaitos

Arabkooshsar ja Andersen tutkivat korkean lämpötilan lämpövarastoon perustuvaa systeemiä, joka pystyy tuottamaan sekä sähköä että kaukolämpöä. Systeemi on optimoitu Tanskaan, jossa energiasektori on melko samanlainen kuin Suomessa. Uusiutuvien, etenkin tuulivoiman, osuus on suuri, ja maassa on kattava kaukolämpöverkko. Tanskassa, kuten Suomessakin, on suuri tarve sähköntuotannon vaihteluita tasaaville systeemeille. Perinteiset sähköä lämmöksi muuttavat systeemit, kuten sähkökattilat ja lämpöpumput, eivät pysty tuottamaan sähköä, joten ne toimivat vain alassäätöön. Korkean lämpötilan lämpövarastoja voidaan ladata ylituotannolla, mutta niitä voidaan myös purkaa sähkö- ja lämpöenergiaksi silloin kun kysyntä on suurimmillaan.

Tutkimuksissaan Arabkoohsar ja Andresen päätyivät avoimeen ulkoisesti lämmitettyyn Brayton-kiertoon kolmella kompressorivaiheella ja kolmella turbiinivaiheella. Välijäähdytyksellä vähennetään kompressorien tekemää työtä ja tuotetaan samalla kaukolämpöä. Turbiinivaiheiden välisellä välilämmityksellä taas lisätään prosessin tehoa.



Kuva 8: Kuva simuloidusta koejärjestelystä. (Arabkoohsar and Andresen, 2017b, muokattu)

Laskelmissa ja simulaatioissaan Arabkoohsar ja Andresen saivat prosessin kokonaishyötysuhteeksi 80,2 %, sähköntuotannon hyötysuhteeksi 31,4 % ja exergiahyötysuhteeksi 56,1 %. Sen todettiin myöskin vastaavan erittäin hyvin tarpeeseen tasoittaa tuulivoimantuotannon vaihteluja. Systeemi todettiin myös taloudellisesti kannattavaksi. (Arabkoohsar and Andresen, 2017b)

6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin korkean lämpötilan lämpövarastojen roolia ja potentiaalia sähkö- ja lämpöenergian varastoinnissa. Painopiste oli uusiutuvan energian tuotannon vaihtelun tasaamisessa sekä sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannossa. Työssä esiteltiin lyhyesti myös muita energiavarastoja.

Erityisen tarkastelun kohteena olivat lämpöenergian muuttaminen takaisin sähköksi erilaisia lämpövoimakoneita hyödyntäen sekä lämpövarastojen integroiminen osaksi sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Esitellyt kiertoprosessit, kuten Brayton-, Rankine- ja Stirling-kierrot tarjoavat useita kohtuullisen hyvän hyötysuhteen vaihtoehtoja sähköntuotantoon. Lämpövoimakoneen hyötysuhde riippuu erityisesti käytetyn lämpövaraston lämpötilasta.

Työssä käsiteltiin myös suurten koelaitosten simulaatioita ja tutkimuksia, joiden perusteella esimerkiksi avoimella Brayton-kierrolla toimivat järjestelmät voivat saavuttaa yli 80 prosentin kokonaishyötysuhteen, mikäli järjestelmä on kytketty osaksi kaukolämpöverkkoa. Samalla näytettiin, että tällaiset ratkaisut voivat tukea sähkömarkkinoiden tasapainottamista ja parantaa uusiutuvan energian käytettävyyttä taloudellisesti kannattavalla tavalla – erityisesti intraday-markkinoilla.

LÄHTEET

1. 3.7 Brayton Cycle, n.d. URL https://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/node27.html (viitattu 11.9.24).
2. AR, 2021. Rankine Cycle. Chemical and Process Engineering. URL https://www.arhse.com/rankine-cycle/ (accessed 10.1.24).
3. Arabkoohsar, A., Andresen, G.B., 2017a. Design and analysis of the novel concept of high temperature heat and power storage. Energy 126, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.001
4. Arabkoohsar, A., Andresen, G.B., 2017b. Dynamic energy, exergy and market modeling of a High Temperature Heat and Power Storage System. Energy 126, 430–443. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.065
5. Çengel, Y.A., Boles, M.A., Kanoğlu, M., 2019. Thermodynamics: an engineering approach, Ninth edition, International student edition. ed. McGraw-Hill Education, New York, NY.
6. Douadi, O., Ravi, R., Faqir, M., Essadiqi, E., 2022. A conceptual framework for waste heat recovery from compression ignition engines: Technologies, working fluids & heat exchangers. Energy Conversion and Management: X 16, 100309. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100309
7. Hoff, C.M., 2022. Energy storage technologies and applications, 1st ed. ed. Artech House, Norwood, MA.
8. Holy, F., Textor, M., Lechner, S., 2021. Gas turbine cogeneration concepts for the pressureless discharge of high temperature thermal energy storage units. Journal of Energy Storage 44, 103283. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103283
9. IRENA, n.d. Innovation outlook: Thermal energy storage.
10. Jarva, K., Niskanen, M., n.d. STIRLING-MOOTTORI PUUKAASUKÄYTÖSSÄ.
11. Johnson, D.C., n.d. Heat Engine Projects [WWW Document]. URL https://www.redrok.com/engine.htm (accessed 9.11.24).
12. Li, G., 2016. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. Renewable and Sustainable Energy Reviews 53, 897–923. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006
13. Metamorphic rock - Pressure, Temperature, & Deformation | Britannica [WWW Document], n.d. URL https://www.britannica.com/science/metamorphic-rock/Metamorphic-variables (accessed 2.26.24).
14. Reddy, K.S., Mudgal, V., Mallick, T.K., 2018. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. Journal of Energy Storage 15, 205–227. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.005
15. Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2018. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability (Switzerland) 10. https://doi.org/10.3390/su10010191
16. Schleicher, R., 2010. AN ASSESSMENT OF THE BRAYTON CYCLE FOR HIGH PERFORMANCE POWER PLANTS [WWW Document]. URL https://web.archive.org/web/20100629003024/http://aries.ucsd.edu/LIB/REPORT/CONF/ANS00/schleicher.pdf (accessed 11.9.24).
17. Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13, 318–345. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005
18. Stevanovic, D., Rembold, T., 2016. High temperature energy storage based on hot air turbine and pebble-heater technology, in: 2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA). Presented at the 2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA), IEEE, Belgrade, Serbia, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748767

19. Tian, Y., Zhao, C.Y., 2013. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Applied Energy 104, 538–553. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051

20. Uusiutuva energia - Työ- ja elinkeinoministeriön verkkopalvelu, n.d. . Työ- ja elinkeinoministeriö. URL https://tem.fi/uusiutuva-energia (accessed 10.25.23).

21. Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., Rasmussen, C.N., 2015. Review of energy storage system for wind power integration support. Applied Energy 137, 545–553. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103