



CHP-LAITOKSEN SÄÄTÖKYVYN JA TEHOKKUUDEN KEHITTÄMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Juuso Yli-Mikola

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Jussi Saari

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Juha Kouki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Juuso Yli-Mikola

CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittäminen

Energiatekniikan diplomityö

2023

101 sivua, 39 kuvaa, 11 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Jussi Saari

Avainsanat: CHP, säätökyky, tehokkuus, power-to-heat, sähkökattila, energiavarastot, kaukolämpöakku, puupolttoaineen kuivaus

Sähkön keskimääräinen markkinahinta ja hintavolatiliteetti ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosien aikana. Sähkön hintavolatiliteettiin vaikuttaa esimerkiksi uusiutuvat säästä riippuvat sähköntuotantomuodot, kuten tuuli- ja aurinkovoima, joiden kapasiteetin ennustetaan kasvavan voimakkaasti. Lisäksi puupolttoaineiden kysyntä on kasvanut samalla kun niiden saatavuus on heikentynyt, joka on johtanut niukkuuden kasvuun ja hintojen nousuun. Nopeasti muuttuva toimintaympäristö ohjaa CHP-laitoksia kehittämään säätökykyään ja tehokkuuttaan, jotta laitoksien toiminta olisi kannattavaa myös tulevaisuudessa.

Tässä työssä tutkitaan CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämistä power-to-heat teknologioiden, energiavarastojen ja puupolttoaineen kuivauksen avulla. Työn tarkoituksena on kartoittaa edellä mainittujen teknologioiden teknistaloudellista potentiaalia osana CHP-laitosta. Työssä tarkastellaan esimerkkilaskentojen avulla lähemmin sähkökattilaa, kaukolämpöakkuja sekä kuoren kuivausta viirakuivurilla. Sähkökattila tarjoaa vaihtoehtoisen ja kustannustehokkaan tavan tuottaa lämpöä sähkön ollessa edullista. Kaukolämpöakun avulla voidaan puolestaan optimoida sähköntuotantoa ajallisesti. Kuoren kuivaus kasvattaa sen tehollista lämpöarvoa ja energiamäärää, jolla voidaan korvata osa polttoaineen hankinnasta.

Työssä käsitellyistä teknologioista suurin osa on kypsyyssasteeltaan kaupallisella tasolla. Energiavarastoista jotkin teknologiat vaativat vielä kehitystä saavuttaakseen kaupallisen tason. Lisäksi lämpöpumpuilla on lämpötilatasoon liittyviä rajoitteita. Laskentaesimerkeissä käsitellyt sähkökattila, kaukolämpöakku ja kuoren kuivaus viirakuivurilla ovat koeteltua kaupallisen tason teknologiaa. Laskentojen tulokset osoittavat, että kyseisillä teknologioilla on mahdollista saavuttaa suuria taloudellisia hyötyjä oikeassa toimintaympäristössä. Potentiaaliin vaikuttaa kuitenkin moni asia, kuten sähkön ja polttoaineiden hintakehitys, joita on vaikea ennustaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Juuso Yli-Mikola

Development of flexibility and efficiency of the CHP plant

Master's thesis

2023

101 pages, 39 figures, 11 tables and 6 appendices

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral researcher Jussi Saari

Keywords: CHP, flexibility, efficiency, power-to-heat, electric boiler, energy storage, district heating battery, wood fuel drying

The average market price and price volatility of electricity have increased significantly in recent years. Electricity price volatility is affected, for example, by weather-dependent renewable electricity production, such as wind and solar power, which capacity is expected to grow strongly in the future. In addition, the demand for wood fuels has increased while the supply has decreased, which has led to an increase in scarcity and prices. The rapidly changing operating environment guides CHP plants to develop their flexibility and efficiency so that the operation of the plants would be profitable in the future as well.

This thesis investigates the development of flexibility and efficiency of a CHP plant by means of power-to-heat technologies, energy storage and wood fuel drying. The aim of the thesis is to map the techno-economic potential of the aforementioned technologies as part of a CHP plant. In the thesis, with the help of example calculations, a closer look is taken at the electric boiler, the district heating battery, and the drying of the bark with a belt dryer. The electric boiler offers an alternative and cost-effective way to produce heat when the price of electricity is low. The district heating battery can be used to optimize electricity production over time. The drying of bark increases its effective heating value and the amount of energy, which can be used to replace part of the purchase of fuel.

Most of the technologies discussed are at a commercial level of maturity. Regarding energy storage, some technologies still require development to reach a commercial level. In addition, heat pumps have limitations related to the temperature level. The electric boiler, district heating battery and belt dryer are tested commercial level technology. The results of the calculations show that it is possible to achieve great economic benefits with the technologies in question in the right operating environment. However, the potential is affected by many things, such as electricity and fuel price trends, which are difficult to predict.

ALKUSANAT

Aluksi haluaisin esittää kiitokseni Pohjolan Voimalle mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta diplomityöaiheesta, jonka parissa sain syventää osaamistani. Kiitos myös Pohjolan Voiman ja mukana olleiden tuotantolaitoksien henkilöstölle sekä muille, jotka edistivät työtäni. Eri-tyiskiitokset työni ohjaajalle Juha Koukille, jolta sain erinomaisia neuvoja ja kommentteja työhöni liittyen, sekä tehtäväesihenkilölleni Jarmo Tervolle, joka oli myös tiiviisti mukana.

Lämpimät kiitokset työni ohjaajana yliopiston puolelta toimineelle Esa Vakkilaiselle hyvistä ohjeista ja kommentteista, sekä LUT-yliopistolle laadukkaasta opetuksesta ja loistavista opiskelupuitteista. Kiitos myös opiskelutovereilleni antoisista opiskeluhetkistä. Hyvällä porukalla hommat luistivat ja haastavimmatkin pulmat saatiin ratkaistua. Kyllä se niin on, että yhdessä tekemisessä on voimaa, mikä kannattaa pitää mielessä myös opiskelujen jälkeen.

Haluan kiittää erityisesti myös avopuolisoani sekä muita läheisiäni tuesta ja ymmärryksestä opiskelujeni aikana sekä diplomityötä tehdessäni. Kannustuksella ja pienillä teoilla oli suuri rooli opintojeni ja diplomityöni valmistumisessa.

Tampereella 25.5.2023

Juuso Yli-Mikola

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
H_r	reaktioentalpia	[J/mol]
h	faasimuutosentalpia	[J/kg]
m	massa	[kg]
n	ainemäärä	[mol]
P	sähköteho	[W]
Q	lämpöteho, lämpöenergia	[W], [J]
T	lämpötila	[°C, K]
V	tilavuus	[m ³]
W	työ	[J]

Kreikkalaiset

Δ	muutos	
ε_L	lämpökerroin	
η	kokonaishyötysuhde	
ρ	tiheys	[kg/m ³]
σ	rakennusaste	

Alaindeksit

1	materiaalin olomuoto ennen faasimuutosta
2	materiaalin olomuoto faasimuutoksen jälkeen
A	yhdiste A
el	sähkö
net	netto

Lyhenteet

aFRR	automaattinen taajuuden palautusreservi (Automatic Frequency Restoration Reserve)
BFB	kerrosleiju (Bubbling Fluidized Bed)
CAES	paineistetun ilman energiavarasto (Compressed Air Energy Storage)
CFB	kiertoleiju (Circulating Fluidized Bed)
CHP	yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto (Combined Heat and Power)
COP	lämpökerroin (Coefficient Of Performance)
FCR	taajuuden vakautusreservi (Frequency Containment Reserve)
FCR-D	taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances)
FCR-N	taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal operation)
FFR	nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve)
FRR	taajuuden palautusreservi (Frequency Restoration Reserve)
KL	kaukolämpö
KM	keskimääräinen sähkön hintaprofiili
LAES	nesteytetyn ilman energiavarasto (Liquid Air Energy Storage)
mFRR	manuaalinen taajuuden palautusreservi (Manual Frequency Restoration Reserve)
PCM	faasimuutosmateriaali (Phase Change Material)
PHES	pumppuvesivarasto (Pumped Hydro Energy Storage)
PtG	Power-to-Gas
PtH, P2H	Power-to-Heat
PtX, P2X	Power-to-X
RR	korvaava reservi (Replacement Reserve)
SMES	suprajohtava magneettinen energiavarasto (Superconductive Magnetic Energy Storage)
TES	lämpöenergiavarasto (Thermal Energy Storage)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
1.1	Työn tausta	10
1.2	Tavoitteet ja rajaukset	11
1.3	Työn rakenne.....	12
2	Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto	13
2.1	Höyryvoimalaitokset	14
2.1.1	Teollisuuden vastapainevoimalaitokset	16
2.1.2	Kaukolämpövoimalaitokset	17
2.2	Leijupoltto	19
2.2.1	Kerrosleijukattilat	20
2.2.2	Kiertoleijukattilat	21
2.3	Perinteinen ajotapa ja säätökyky	23
2.4	CHP-laitosten toimintaympäristö.....	24
2.5	Pohjolan Voiman CHP-laitokset	27
3	Power-to-Heat - sähköllä lämpöä	28
3.1	Sähkökattilat.....	29
3.2	Lämpöpumput	31
4	Energiavarastot	35
4.1	Energian varastointiteknologiat	36
4.2	Lämpöenergian varastointi	39
4.2.1	Tuntuvan lämmön varastot	40
4.2.2	Latenttilämmön varastot	42
4.2.3	Termokemialliset energiavarastot.....	44
4.3	Sähköenergian varastointi	45
4.3.1	Akut	45

4.3.2	Virtausakut.....	46
5	Puupolttoaineen kuivaus.....	48
5.1	Puupolttoaineiden niukkuus	52
5.2	Materiaalin kuivuminen	54
5.3	Kuivausteknologiat	56
5.3.1	Viirakuivuri.....	57
5.3.2	Rumpukuivuri	58
5.3.3	Kaskadikuivuri.....	60
5.3.4	Pneumaattinen kuivuri	60
5.3.5	Kiintopetikuvurit.....	61
5.4	Haasteet	62
6	CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittäminen.....	64
6.1	Sähkökattila.....	64
6.2	Kaukolämpöakku	71
6.3	Kuoren kuivaus	77
7	Teknologioiden potentiaali	84
8	Johtopäätökset	86
9	Yhteenveto.....	89
	Lähteet	90

Liitteet

Liite 1. Lämmön varastomateriaalien ominaisuuksia

Liite 2. Akkujen ja virtausakkujen ominaisuuksia

Liite 3. Puupolttoaineen kuivausteknologioiden ominaisuuksia

Liite 4. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset

Liite 5. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset

Liite 6. Kuoren kuivauksen tulokset

1 Johdanto

Energiasektorilla eletään poikkeuksellisia aikoja. Energiamurros on ollut esillä jo pitkään, jonka seurauksena fossiilisista polttoaineista pyritään pääsemään eroon kiihtyvällä tahdilla. Sähkön keskimääräinen markkinahinta ja hintavolatiliteetti ovat kasvaneet merkittävästi viime vuosina. Lisäksi tuntitaseesta siirrytään vaiheittain varttitaseeseen toukokuussa 2023, joka tulee osaltaan vaikuttamaan sähkömarkkinoiden luonteeseen. Myös puupolttoaineiden niukkuus on kasvanut, jonka seurauksena hinnat ovat nousseet. Edellä mainitut seikat vaikuttavat nykyisten tuotantolaitosten toimintaan ja niiden on sopeuduttava uuteen toimintaympäristöön erilaisin keinoin.

Sähkön hintavolatiliteettiin vaikuttavat esimerkiksi uusiutuvat säästä riippuvat sähköntuotantomuodot, kuten tuuli- ja aurinkovoimatuotanto, joiden ennustetaan kasvavan merkittävästi. Suomen tuulivoimakapasiteetti on kasvanut voimakkaasti 2010-luvun alusta lähtien. Aurinkovoimakapasiteetti on Suomessa toistaiseksi melko pieni, mutta teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden ennustetaan yleistyvän. Aurinkovoimakapasiteetin odotetaan kasvavan nopeasti teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden yleistymisen myötä (Ahola 2022, 29).

Lämmön ja sähkön yhteistuotantolaitokset, eli CHP-laitokset (engl. Combined Heat and Power) voivat sopeutua uudenlaiseen toimintaympäristöön kehittämällä säätökykyään ja tehokkuuttaan. Sähkön hinnan laskiessa riittävän alas sen tuottaminen CHP-laitoksissa on kannattamatonta, koska tuotantokustannuksia ei saada katettua. Lämmöntarve on kuitenkin täytettävä, joten osa lämmöntarpeesta voitaisiin tuottaa kustannustehokkaasti power-to-heat teknologioilla sähkön ollessa edullista.

Sähkön hinnan ollessa korkea sitä olisi puolestaan kannattavaa tuottaa mahdollisimman suurella teholla. CHP-laitosten sähköntuotannon säätökyky on kuitenkin rajallinen, sillä sähköntuotanto on sidottu lämpökuorman laitoksen rakennusasteen mukaisesti. Sähköntuotannon säätökykyä voidaan parantaa vähentämällä sähköntuotannon riippuvuutta lämpökuormasta lämpövaraston avulla, jolloin ylimääräinen lämpö varastoidaan myöhemmin käytettäväksi. Säätökyvyn kehittäminen parantaa CHP-laitoksen tuotannon tehokkuutta sekä kykyä sähkömarkkinoilla toimimiseen.

CHP-laitoksien säätökyvyn kehittäminen hyödyttää myös sähköjärjestelmää. Sähkön kulutuksen ja tuotannon on oltava joka hetki tasapainossa. Säästä riippuva vaihteleva tuotanto haastaa sähköjärjestelmää, jonka vuoksi joustoa ja säätökykyä tarvitaan. Suomessa on 2010-luvun alusta alkaen poistunut suuri määrä säätökykyistä lauhdevoimakapasiteettia ja samaan aikaan säästä riippuvan tuotantokapasiteetin määrä on kasvanut voimakkaasti. Täten CHP-laitoksien säätökyvyn kehittäminen tuo sähköjärjestelmään kaivattua joustoa.

Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen korvaaminen on kiristänyt kilpailua puupolttoaineista ja kasvattanut niiden niukkuutta. Puupolttoaineen kuivaus kasvattaa sen tehollista lämpöarvoa ja energiamäärää. Kasvaneella energiamäärällä voidaan korvata osa polttoaineen hankinnasta, joka voi tuoda taloudellista hyötyä sekä helpotusta niukkuuteen. Lisäksi laadukas polttoaine on tärkeää tilanteissa, joissa ollaan lähellä kattilan minimi- tai maksimikuormaa.

CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämistä on tutkittu paljon. Tämän työn tarkoituksena on selvittää, mitä mahdollisuuksia power-to-heat teknologiat, energiavarastot ja puupolttoaineen kuivausteknologiat tarjoavat nyt ja lähitulevaisuudessa CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämiseen, sekä mikä on teknologioiden teknistaloudellinen potentiaali. Tämän työn kaltaista laajaa eri teknologioiden teknistaloudellisen potentiaalın kartoitusta on tehty vähemmän. Aikaisemmat tutkimukset ovat keskittyneet tavallisesti rajatumpaan määrään eri teknologioita. Esimerkiksi power-to-heat teknologioiden ja lämpövarastojen toimintaa CHP-laitoksen yhteydessä sekä puupolttoaineen kuivausta on tutkittu paljon, mutta sähkön varastointia CHP-laitoksen yhteydessä on puolestaan tutkittu vähemmän.

1.1 Työn tausta

Tämä diplomityö on osa Pohjolan Voiman laajempaa selvitystä, jossa pyritään löytämään keinoja CHP-laitosten säätökyvyn kehittämiseen. Muuttunut sähkömarkkinatilanne vaatii CHP-laitoksilta aikaisempaa parempaa säätökykyä sekä joustavuutta. Lisäksi erilaisista syistä johtuva puupolttoaineiden niukkuus ja hintojen kasvu kannustavat käyttämään polttoaineita entistä tehokkaammin. Selvityksessä ovat mukana Pohjolan Voiman CHP-laitokset Kaukaan Voima, Kymin Voima, Porin Prosessivoima ja Rauman Biovoima, jotka ovat sekä prosessi-, että kaukolämpöä tuottavia voimalaitoksia.

Pohjolan Voima on vuonna 1943 perustettu suomalainen energiakonserni, jonka tehtävänä on toimittaa lämpöä ja sähköä osakkailleen omakustannushintaperiaatteella, eli niin kutsutulla mankala-periaatteella. Energia luovutetaan osakkaille ja osakkaat vastaavat kustannuksista osakesarjan omistuksen mukaisessa suhteessa. (Pohjolan Voima Oyj 2022.)

Pohjolan Voima omistaa kokonaisuudessaan tai osittain yhteensä 18 vesi-, lämpö- ja ydinvoimalaitosta eri puolilta Suomea ja tuottaa merkittävän osuuden Suomessa tuotetusta sähköstä. Vuonna 2022 Pohjolan Voiman sähköntuotanto oli 12,2 TWh ja lämmöntuotanto 3,1 TWh. Sähköntuotannosta 97 % ja lämmöntuotannosta 80 % oli hiilidioksidineutraalia. (Pohjolan Voima Oyj 2023a.)

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on selvittää mitä mahdollisuuksia power-to-heat teknologiat, energiavarastot ja puupolttoaineen kuivausteknologiat tarjoavat nyt ja lähitulevaisuudessa CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämiseen. Työn tarkoituksena on tarjota tietoa nykyisten ja tulevien teknologioiden teknistaloudellisesta potentiaalista, jonka perusteella tutkimuksessa mukana olevat laitokset voivat valita kiinnostavia vaihtoehtoja tarkempiin selvityksiin. Työn tarkoituksena ei ole tehdä laitospohtaista tarkastelua. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Millaisia ratkaisuja power-to-heat teknologiat, energiavarastot ja puupolttoaineen kuivausteknologiat tarjoavat nyt ja lähitulevaisuudessa CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämiseen?
2. Mikä on teknologioiden teknistaloudellinen potentiaali, eli mikä on niiden kypsyyssaste ja kustannustehokkuus?
3. Mitä etuja teknologiat antavat prosessi- ja kaukolämpöä tuottavalle CHP-laitokselle?

Teknologioiden teknistaloudellista potentiaalia kartoitetaan kirjallisuuden ja laskentaesimerkkien avulla. Kirjallisuudesta etsitään vastauksia muun muassa teknologioiden kypsyyssasteeseen, tärkeimpiin suorituskykyarvoihin sekä investointikustannuksiin. Laskentaesimerkkien avulla kartoitetaan valituilla teknologioilla saavutettavia taloudellisia hyötyjä.

Työssä on tehty seuraavanlaisia rajauksia: CHP-laitoksissa keskitytään vastapainevoimalaitoksiin, koska selvityksessä mukana olevat Pohjolan Voiman laitokset ovat tämän tyyppisiä. Power-to-heat teknologioista käsitellään sähkökattiloita ja kompressiolämpöpumppuja. Energian varastoinnissa keskitytään lämpö- ja sähköenergian varastointiteknologioihin, jotka ovat järkevästi integroitavissa CHP-laitoksen yhteyteen. Polttoaineen kuivauksessa keskitytään puupolttoaineille sopiviin kuivausteknologioihin. Säästökyvyn ja tehokkuuden kehittämistä sekä hyötyjä tutkitaan CHP-laitoksen näkökulmasta. Säästökyvyn kehittäminen hyödyttää myös sähköjärjestelmää, mutta tämän työn tarkoituksena ei ole tutkia hyötyjä yksityiskohtaisesti sähköjärjestelmän näkökulmasta.

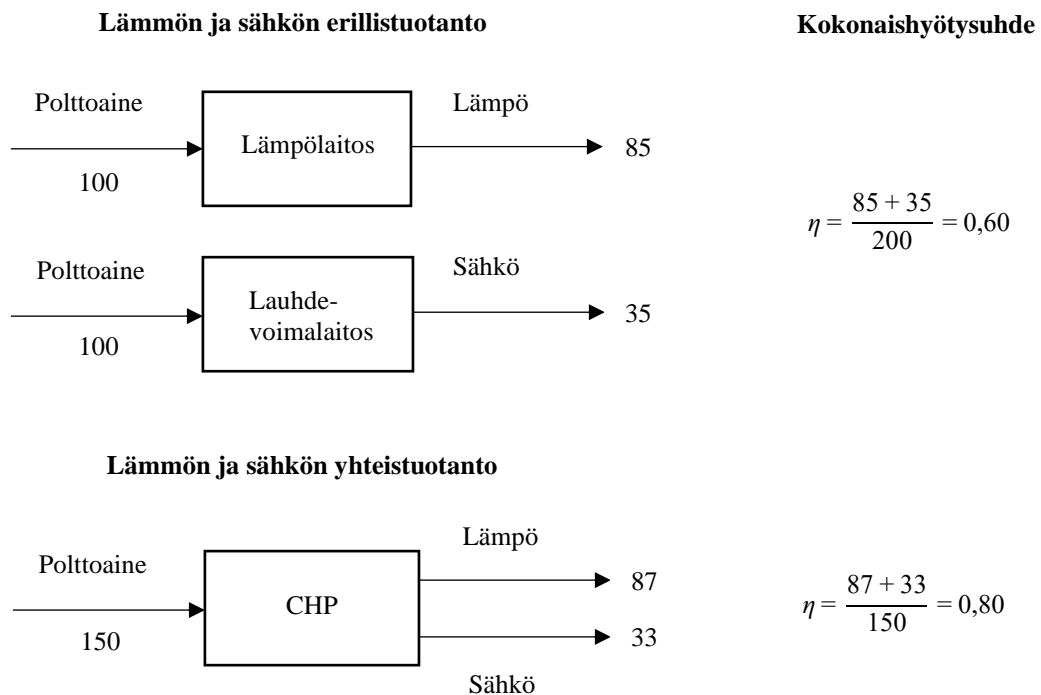
1.3 Työn rakenne

Työn kirjallisuusosa koostuu luvuista 2–5. Luvussa 2 käsitellään yhdistettyä lämmön ja sähkön tuotantoa, höyryvoimalaitoksia, leijupoltoa, CHP-laitosten perinteistä ajotapaa ja säästökykyä, CHP-laitosten toimintaympäristöä sekä esitellään lyhyesti työssä mukana olevat Pohjolan Voiman CHP-laitokset. Luvussa 3 käsitellään kahta power-to-heat teknologiaa, eli sähkökattiloita ja lämpöpumppuja. Luvussa 4 käsitellään energiavarastoteknologioita lämpö- ja sähköenergian varastointiin. Luvussa 5 käsitellään puupolttoaineiden niukkuutta, kuivumisen teoriaa, kuivausteknologioita sekä kuivauksen haasteita.

Työn soveltava osa koostuu luvuista 6–8. Luvussa 6 käsitellään esimerkkilaskentoja sähkökattilasta, kaukolämpöakusta ja kuoren kuivauksesta viirakuivurilla. Luvussa 7 pohditaan työssä käsiteltyjen teknologioiden potentiaalia. Luvussa 8 esitetään työn johtopäätökset ja pohditaan tuloksia. Lopuksi luvussa 9 esitetään yhteenveto työstä.

2 Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto

Yhdistetyllä lämmön ja sähkön tuotannolla, eli CHP-tuotannolla tarkoitetaan prosessia, jossa tuotetaan samanaikaisesti sekä lämpöä että sähköä. CHP-prosessin hyötysuhde on korkea ja on huomattavasti tehokkaampaa tuottaa lämpö ja sähkö yhdistetyssä prosessissa, kuin kahdessa erillisessä prosessissa. Yhteistuotannossa sama energiamäärä saadaan tuotettua pienemmällä polttoainemäärällä kuin erillistuotannossa. Täten polttoainetta säästyy ja myös päästöt ovat pienemmät. (Darrow et al. 2017, 8–10; EDUCOGEN 2001, 7–8.) Tyypillisiä CHP-laitoksia ovat esimerkiksi höyryvoimalaitokset, kaasuturbiinilaitokset, moottorivoimalaitokset ja kombivoimalaitokset. Polttoaineen kulutusta ja hyötysuhdetta on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Lämmön ja sähkön erillistuotannon ja yhteistuotannon polttoaineen kulutuksen ja hyötysuhteen vertailu (mukaiillen EDUCOGEN 2001, 8).

CHP-laitoksien ensisijainen tehtävä on tuottaa tarvittava määrä lämpöä. Sähköä tuotetaan laitoksen rakennusasteen mukaisessa suhteessa. Rakennusasteeksi kutsutaan CHP-laitoksen sähkön ja lämmön tuotannon suhdetta ja se vaihtelee laitoskohtaisesti. Rakennusaste voidaan esittää muodossa

$$\sigma = \frac{P_{el,net}}{Q} \quad (1)$$

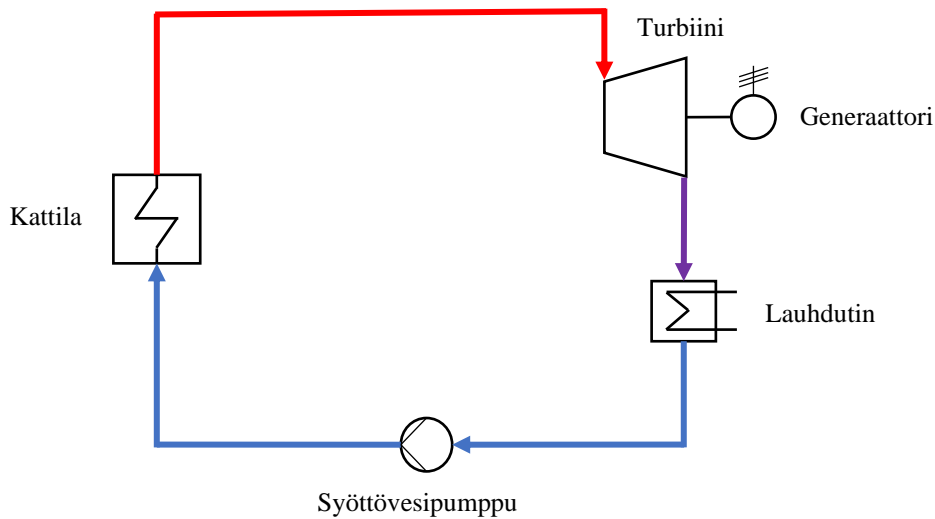
jossa σ on rakennusaste, $P_{el,net}$ on laitoksen nettosähköteho [W] ja Q lämpöteho [W].

Suomessa CHP-laitokset tuottavat merkittävän osuuden teollisuuslämmöstä sekä kaukolämmöstä. Vuonna 2021 Suomessa tuotettiin noin 52 TWh teollisuuslämpöä, josta noin 41 TWh (78 %) tuotettiin yhteistuotantona. Vastaavasti kaukolämpöä tuotettiin noin 41 TWh, josta noin 21 TWh (52 %) tuotettiin yhteistuotantona. Lisäksi kyseisenä vuonna Suomessa tuotettiin sähköä noin 69 TWh, josta noin 9 TWh (12 %) tuotettiin teollisuuden CHP-laitoksissa ja noin 11 TWh (16 %) kaukolämpöä tuottavissa CHP-laitoksissa. (Suomen virallinen tilasto 2022.)

2.1 Höyryvoimalaitokset

Höyryvoimalaitoksen toiminta perustuu Clausius-Rankine-prosessiin, joka toimii todellisen höyryvoimalaitosprosessin ideaalisena vertailuprosessina (Wikstén 1998, 57–59). Höyryvoimalaitoksessa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia muunnetaan turbiinin mekaaniseksi energiaksi ja edelleen sähköksi generaattorin avulla. Prosessin kiertoaineena toimii vesi, joka on prosessin vaiheesta riippuen joko nesteen tai höyryn muodossa. (Lampinen 2006, 169.)

Kuvassa 2 on esitetty yksinkertaistettu höyryvoimalaitosprosessi, joka koostuu kattilasta, turbiinista, generaattorista, lauhduttimesta ja syöttövesipumpusta. Kattilassa polttoaineen sisältämä kemiallinen energia vapautuu palamisprosessissa, jonka avulla syöttövesi höyrystetään ja höyry tulistetaan. Tulistettu höyry johdetaan turbiiniin, jossa se paisuu pyörittäen turbiinia. Pyörimisenergia muunnetaan sähköksi turbiinin kanssa samalla akselilla olevan generaattorin avulla. Turbiinilta höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa se lauhtuu vedeksi luovuttaen lämpöä. Lauhduttimelta vesi pumpataan syöttövesipumpun avulla takaisin kattilaan. (Lampinen 2006, 169; Teir 2003, 6.)



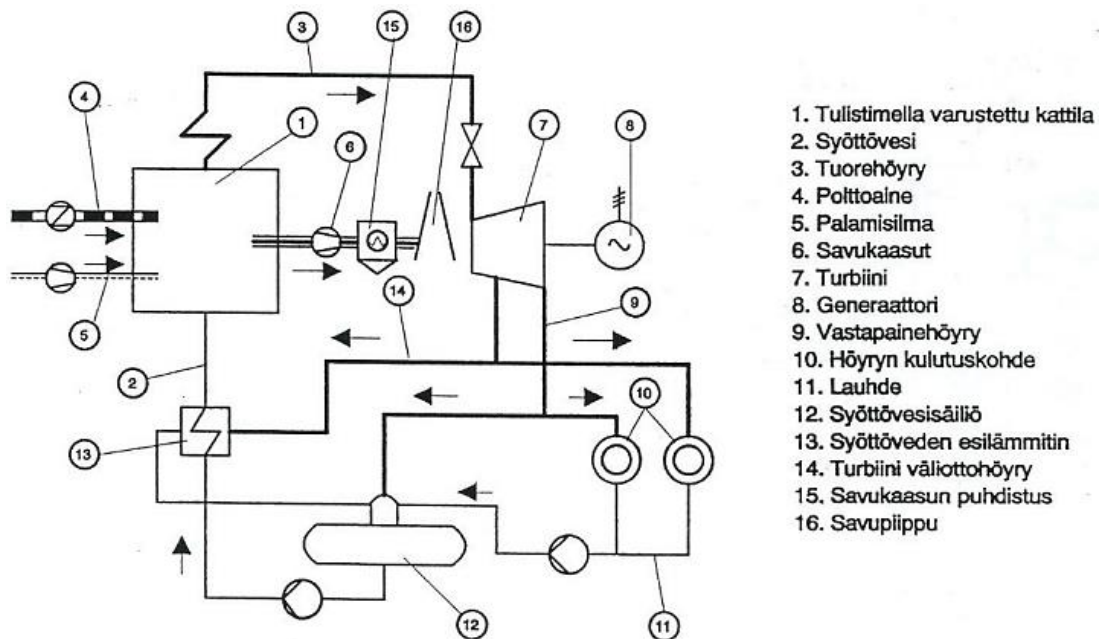
Kuva 2. Yksinkertaistettu höyryvoimalaitosprosessi.

Todellisessa höyryvoimalaitosprosessissa on huomattavasti enemmän komponentteja ja prosessikytkentä on monimutkaisempi kuin kuvassa 2. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi höyryvoimalaitoksessa on muun muassa lauhdepumppu, syöttövesisäiliö, mahdollisesti syöttöveden esilämmittimiä sekä erilaisia apulaitteita, kuten pumppuja, puhaltimia ja venttiileitä. Lisäksi esimerkiksi turbiini voi koostua korkea-, keski- ja matalapaine osista. Laitoksien kokoonpanot vaihtelevat tapauskohtaisesti.

Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa turbiinin jälkeisen höyryn paineen perusteella lauhdevoimalaitoksiin ja vastapainevoimalaitoksiin. Lauhdevoimalaitoksissa höyry paisuu turbiinissa niin alhaiseen paineeseen, ettei höyryn lauhtumislämpöä voida hyödyntää lämmitystarkoituksiin, jolloin lämpö siirretään tyypillisesti vesistöön. Täten lauhdevoimalaitos tuottaa vain sähköä. Vastapainevoimalaitoksissa tuotetaan sekä lämpöä, että sähköä. Höyryn paisunta turbiinissa päättyy korkeampaan paineeseen, jolloin höyryn lauhtumislämpöä voidaan hyödyntää lämmitystarkoituksiin. Vastapainevoimalaitokset voidaan jakaa edelleen teollisuuden vastapainevoimalaitoksiin ja kaukolämpövoimalaitoksiin sen mukaan, mihin tarkoitukseen lämpöä tuotetaan. Vastapainevoimalaitos voi myös olla viimeksi mainittujen yhdistelmä. (Huhtinen et al. 2013, 12.)

2.1.1 Teollisuuden vastapainevoimalaitokset

Teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa tuotetaan prosessilämpöä teollisuuden tarpeisiin. Lämmöntarpeen ollessa riittävän suuri ja ympärivuotinen, voidaan lämmön lisäksi tuottaa myös sähköä. Prosessilämmön ja sähkön lisäksi voidaan tuottaa myös kaukolämpöä paikalliseen kaukolämpöverkkoon. Lämpökuorma on teollisuudessa suhteellisen tasainen ympäri vuoden, ja vaihtelut ovat vähäisempiä kaukolämpökuormaan verrattuna. Teollisuudessa lämmönsiirtoaineena käytetään tyypillisesti höyryä, koska sillä on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet ja sen avulla voidaan siirtää suuria lämpötehoja helposti. (Huhtinen et al. 2013, 63.) Suomessa esimerkiksi metsäteollisuus on suuri teollisuuslämmön kuluttaja. Kuvassa 3 on esitetty esimerkkikytkentä teollisuuden vastapainevoimalaitoksesta.



Kuva 3. Esimerkki teollisuuden vastapainevoimalaitoksen kytkennästä (Huhtinen et al. 2000, 13).

Teollisuuden vastapainevoimalaitosten ensisijainen tehtävä on tuottaa teollisuuden tarvitsema lämpökuorma. Sähköä saadaan sivutuotteena ja sen tuotanto on sidottu lämpökuorman voimalaitoksen rakennusasteen mukaisesti. Teollisuusprosesseissa höyryä tarvitaan korkeammassa paineessa kuin kaukolämpöveden lämmittämisessä, jonka seurauksena

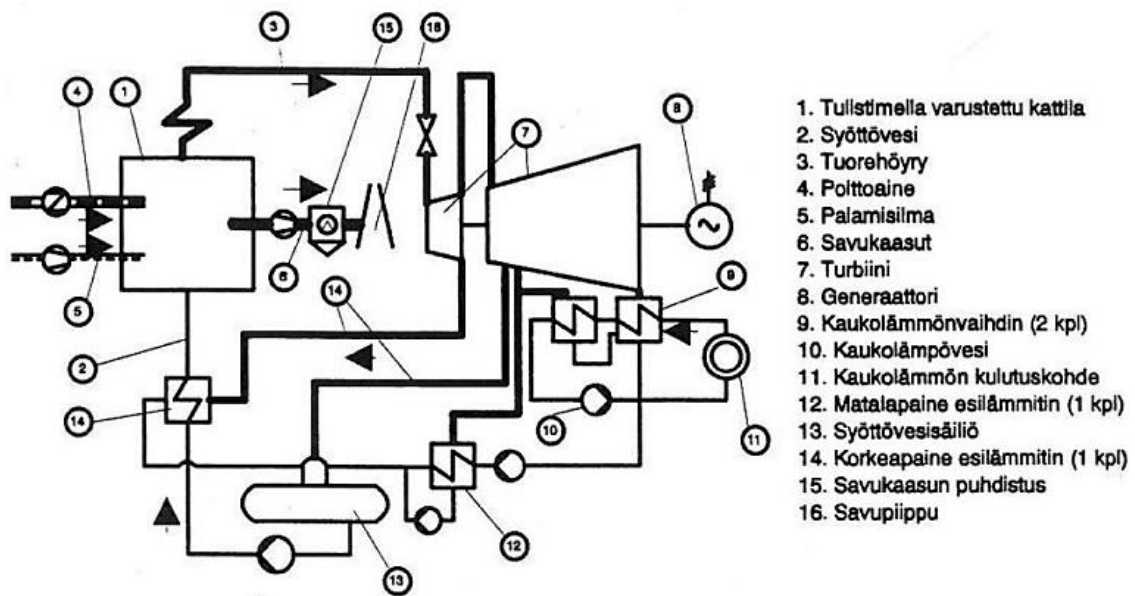
menetetään sähkötehoa. Tästä syystä teollisuuden vastapainevoimalaitosten rakennusasteet ovat tavallisesti hieman matalampia kuin kaukolämpövoimalaitosten. Teollisuusprosessin koko sähköntarvetta ei tavallisesti kyetä kattamaan voimalaitoksen tuotannolla, joten osa sähköstä ostetaan verkosta. (Huhtinen et al. 2013, 64.)

Teollisuudessa prosessihöyryä tarvitaan tavallisesti useassa painetasossa. Höyry paisuu turbiinissa teollisuuden tarpeisiin sopivaan vastapaineeseen, jonka lisäksi höyryä voidaan ottaa korkeammassa paineessa turbiinin väliotoista. Teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa tarvitaan kaukolämpövoimalaitoksiin verrattuna enemmän lisävettä ja veden käsittelyä, koska tyypillisesti vain osa prosessihöyrystä palaa lauhteena voimalaitokselle tai lauhde likaantuu. (Huhtinen et al. 2013, 64–65.)

Teollisuuden vastapainevoimalaitokset käyttävät polttoaineena tyypillisesti teollisuusprosessin sivuvirtoja (Huhtinen et al. 2013, 65). Esimerkiksi metsäteollisuudessa sivuvirtoja ovat puun kuori, sahanpuru ja liete. Sivuvirrat voivat kattaa suuren osan polttoaineentarpeesta, mutta tavallisesti polttoaineita hankitaan myös muualta. Sivuvirtojen hyödyntäminen on tehokasta kiertotaloutta, mutta teollisuusprosessin pysähtyessä myös suuri osa polttoainevirrasta pysähtyy. Voimalaitoksella voi olla velvoite toimittaa kaukolämpöä paikalliseen kaukolämpöverkkoon, jolloin polttoaineesta voi tulla pulaa, ellei muualta hankittua polttoainetta saada riittävästi.

2.1.2 Kaukolämpövoimalaitokset

Kaukolämpövoimalaitokset tuottavat kaukolämpöä paikalliseen kaukolämpöverkkoon, jonka lisäksi ne tuottavat myös sähköä. Sähköteho on sidottu lämpökuormaan voimalaitoksen rakennusasteen mukaisesti, kuten teollisuuden vastapainevoimalaitoksissa. Kaukolämpökuorma vaihtelee ulkolämpötilan mukaan ja vuodenaikaiset vaihtelut ovat suuria. Tehontarve on suurimmillaan talvella huippupakkasten aikaan ja pienimmillään kesällä, jolloin lämpöä tarvitaan lähinnä käyttöveden lämmittämiseen. Lämpökuorma on kesällä tyypillisesti noin 10 % talven huippukuormasta. (Huhtinen et al. 2000, 10; Huhtinen et al. 2013, 12.) Kuvassa 4 on esitetty esimerkkikytkentä kaukolämpövoimalaitoksesta.



Kuva 4. Esimerkki kaukolämpövoimalaitoksen kytkennästä (Huhtinen et al. 2000, 12).

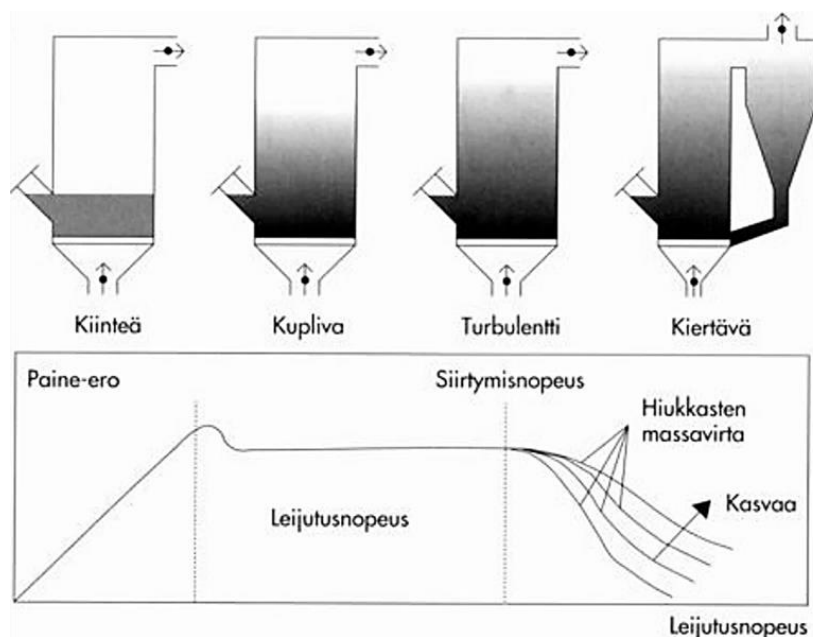
Kaukolämpövesi lämmitetään kaukolämmönvaihtimessa turbiinin jälkeisellä vastapainehöyryllä, jonka paine määräytyy kaukolämpöverkkoon syötettävän veden lämpötilan mukaan. Jos kaukolämpöveden lämpötilaksi halutaan 90 °C, vastapainehöyryn lämpötilan tulee olla korkeampi lämmönvaihtimen asteisuuden vuoksi. Esimerkiksi 1 baarin paineessa höyry lauhtuu noin 100 °C lämpötilassa. Kaukolämpövesi voidaan lämmittää kahdessa vaiheessa (kuva 4), jolloin höyryn voidaan antaa paisua turbiinissa matalampaan paineeseen, jonka ansiosta saadaan enemmän sähkötehoa. (Huhtinen et al. 2013, 22, 48.)

Kaukolämpövoimalaitoksien tehoksi mitoitetaan tyypillisesti noin 50 % kaukolämmön huipputehosta, jolloin niillä kyetään tuottamaan noin 80 % vuotuisesta lämmöntarpeesta. Loput 20 % tuotetaan huippulämpökeskuksilla. Tämä periaate ei kuitenkaan päde hyvin suurissa kaukolämpöverkoissa, joissa tehot ovat tuhansia megawatteja. Kaukolämpövoimalaitokset ovat investoinniltaan kalliita, mutta ne käyttävät edullisia polttoaineita. Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käyttö on vähentynyt ja puuperäisten polttoaineiden ja jätteen käyttö on lisääntynyt. Huippulämpökeskukset ovat investoinniltaan edullisia, mutta niiden käyttämät polttoaineet, kuten maakaasu ja öljy ovat kalliita. Maakaasua ja öljyä on kuitenkin alettu korvaamaan esimerkiksi pelletillä. (Huhtinen et al. 2013, 12, 14.)

2.2 Leijupoltto

Leijupolttotekniikan käyttö energiantuotannossa alkoi 1970-luvulla ja se on nykypäivänä käytetyin polttotekniikka yli 10–20 MW:n tehoilla. Pienemmillä tehoilla käytetään tyypillisesti arinatekniikkaa. (Huhtinen et al. 2013, 36; Vakkilainen 2016, 211.) Leijupolttotekniikkaa käyttävät kattilat jaetaan kerrosleijukattiloihin (engl. Bubbling Fluidized Bed, BFB) ja kiertoleijukattiloihin (engl. Circulating Fluidized Bed, CFB). Leijukattiloissa voidaan käyttää useaa eri polttoainetta samanaikaisesti ja ne soveltuvat huonolaatuisille, kuten kosteille ja korkean tuhkapitoisuuden omaaville polttoaineille, eivätkä ne ole kovin herkkiä polttoaineen laadun vaihtelulle. (Vakkilainen 2016, 212.) Lisäksi typenoksidipäästöjä voidaan hallita tehokkaasti alhaisen palamislämpötilan ansiosta ja rikkipäästöjä mahdollisuudella syöttää kalkkia tulipesään (Huhtinen et al. 2000, 153).

Leijupoltolla tarkoitetaan polttotekniikkaa, jossa polttoaine poltetaan hiekasta ja tuhkasta koostuvassa leijuvassa pedissä. Leijutuksella tarkoitetaan ilmiötä, jossa hienojakoiset kiintoainepartikkelit saadaan käyttäytymään fluidin tavoin (Zhang ja Teir 2003, 155). Petiä leijutetaan puhaltamalla leijutusilmaa tulipesän pohjasta pedin läpi. (Vakkilainen 2016, 213.) Pedin käyttäytyminen ja paine-ero riippuvat leijutusilman nopeudesta kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Leijutusnopeuden vaikutus leijutustilaan ja leijukerroksen paine-eroon (Hyppänen ja Raiko 2002, 492).

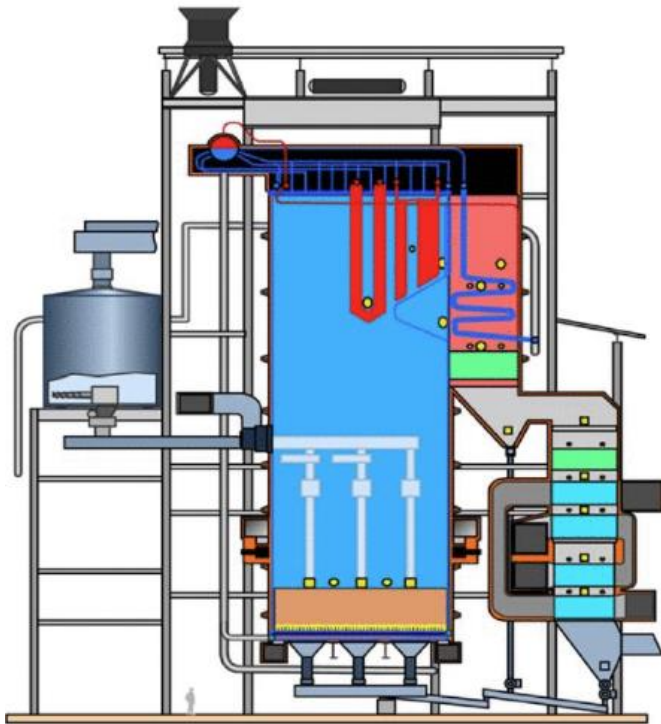
Kun leijutusilman petipartikkeleihin kohdistava voima on yhtä suuri kuin painovoima, peti alkaa leijua. Tätä leijutusilman nopeutta kutsutaan minimileijutusnopeudeksi. Leijutusilman nopeuden kasvaessa minimileijutusnopeutta suuremmaksi ilma kulkee pedin läpi kuplina, jonka seurauksena peti alkaa laajentua ja kuplia. Tämänkaltaista tekniikkaa käyttäviä kattiloita kutsutaan kerrosleijukattiloiksi. Leijutusilman nopeuden kasvaessa petimateriaalin terminaalinopeutta suuremmaksi, petimateriaali tempautuu leijutusilman mukaan ja poistuu tulipesästä savukaasujen mukana. Tulipesästä poistunut petimateriaali erotetaan savukaasuista syklonilla ja palautetaan takaisin tulipesään. Tämänkaltaista tekniikkaa käyttäviä kattiloita kutsutaan kiertoleijukattiloiksi. (Huhtinen et al. 2000, 154–155; Vakkilainen 2016, 213–216.)

Leijukattilat suunnitellaan tapauskohtaisesti esimerkiksi käytettävän polttoaineseoksen sekä tuorehöyryn arvojen perusteella, jonka seurauksena esimerkiksi lämpöpintojen sijoittelussa ja järjestyksessä on kattilakohtaisia eroja (Vakkilainen 2016, 212). Samaan kattilatyyppiin kuuluvat kattilat muistuttavat kuitenkin pääpiirteittäin toisiaan.

2.2.1 Kerrosleijukattilat

Kerrosleijukattilassa pedin korkeus on tyypillisesti 0,4–0,8 m. Pedin pinta on selvästi erotettavissa, jonka jälkeen alkaa vapaa kaasutila. Käytettävän leijutushiekan partikkelikoko on tyypillisesti 0,5–1,5 mm ja leijutusnopeus 1–3 m/s. Polttoaine syötetään useasta kohdasta pedin päälle pudotusputkea pitkin, jotta polttoaine jakautuu tasaisesti koko pedin alueelle. Kerrosleijukattilat sopivat erinomaisesti kosteille polttoaineille, koska pedin lämpökapasiteetti on suuri. Tulipesään syötetty kostea polttoaine sekoittuu kuumaan petimateriaaliin, kuivuu nopeasti ja syttyy palamaan. Lisäksi pedin suuri lämpökapasiteetti auttaa hallitsemaan polttoaineen laadun vaihteluja. (Huhtinen et al. 2000, 155, 157; Huhtinen et al. 2013, 36; Vakkilainen 2016, 217–219.)

Kuvassa 6 on esitetty sivukuva kerrosleijukattilasta. Yksinkertaisesti ajateltuna kerrosleijukattila koostuu tulipesästä ja takavedosta. Suunnitteluratkaisusta riippuen takaveto voidaan jakaa vielä esimerkiksi kahteen osaan, eli ensimmäiseen ja toiseen takavetoon. Säteilytulistin sijaitsee tyypillisesti tulipesän yläosassa tulipesän kattoon ripustettuna. Konvektiotulistin, ekonomaiseri ja palamisilman esilämmitin sijaitsevat takavedossa. (Vakkilainen 2016, 217.)



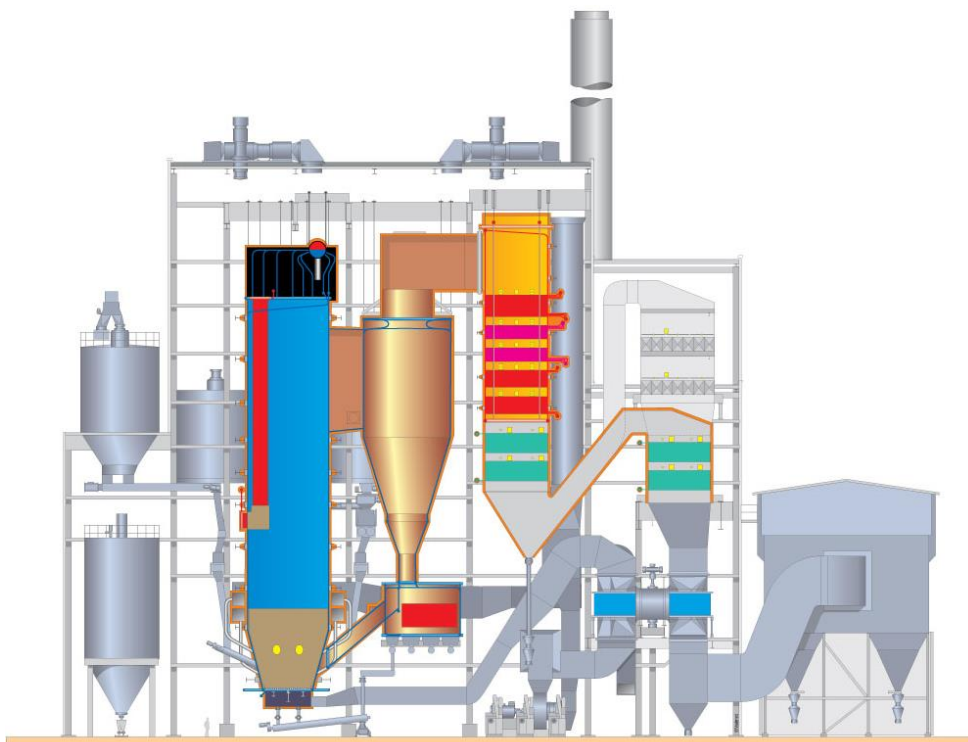
Kuva 6. Kerrosleijukattilan sivukuva (Vakkilainen 2016, 217, alkuperäinen kuva Valmet).

Primääri-ilma, joka toimii myös leijutusilmana, jaetaan tasaisesti koko pedin poikkipintalalle. Ilma puhalletaan tulipesän pohjalla sijaitsevan ilmanjakoarinnan suuttimista. Palamisilmaa vaiheistetaan tuomalla sekundääri- ja tertiääri-ilma tulipesään korkeammalta tasolta, jolloin NO_x -päästöjä voidaan hallita tehokkaasti. Tulipesän alaosa muurataan seinämäputkien eroosion ja ylikuumenemisen ehkäisemiseksi. (Huhtinen et al. 2000, 158; Huhtinen et al. 2013, 36–37; Vakkilainen 2016, 218–220.)

2.2.2 Kiertoleijukattilat

Kiertoleijukattiloissa käytettävä petimateriaali on hienojakoisempaa ja leijutusnopeus suurempi (Huhtinen et al. 2013, 36). Käytettävän leijutushiekan partikkelikoko on tyypillisesti 0,1–0,5 mm ja leijutusnopeus 3–10 m/s. Suuren leijutusnopeuden seurauksena hiukkaset sekoittuvat tehokkaasti, eikä pedin pinta ei ole erotettavissa. Osa petimateriaalista kulkeutuu ulos tulipesästä savukaasujen mukana. Savukaasujen mukana poistuneet hiukkaset erotetaan savukaasuista syklonilla ja palautetaan takaisin tulipesän alaosaan. (Huhtinen et al. 2000, 159; Zhang ja Teir 2003, 157, 161.)

Kuvassa 7 on esitetty sivukuva kiertoileijukattilasta. Yksinkertaisesti ajateltuna kiertoileijukattila koostuu tulipesästä, syklonista, kiinteiden partikkeleiden palautusjärjestelmästä sekä syklonin jälkeisestä konvektio-osasta, jota kutsutaan myös takavedoksi. Lämmönsiirtopintoja voidaan sijoittaa useaan paikkaan. Säteilytulistin sijoitetaan tavallisesti tulipesän seinälle ja hiekkatulistin syklonin alapuolella olevaan hiekkalukkoon. Välitulistin, konvektiotulistin, ekonomaiseri ja palamisilman esilämmitin sijaitsevat takavedossa. (Basu 2015, 6–7; Zhang ja Teir 2003, 157.)



Kuva 7. Kiertoileijukattilan sivukuva (kuva saatu Valmetilta).

Kiertoileijukattilan tulipesä on tyypillisesti poikki-pinta-alaltaan pienempi kuin lämpötehoon vastaavan kokoisen kerrosleijukattilan tulipesä. Tämä johtuu kiertoileijukattilan korkeasta palamishyötysuhteesta ja suuresta lämpötehosta pinta-alaa kohti. (Zhang ja Teir 2003, 161.) Kiertoileijukattilan tulipesän alaosa on kartiomainen ja poikki-pinta-alaltaan pienempi kuin tulipesän yläosa. Tulipesä on suorakaiteen muotoinen ja alaosaan muurattu eroosion ehkäisemiseksi. Syklonit sijaitsevat tulipesän toisella seinustalla, jolloin kyseinen seinusta on leveämpi ja toinen kapeampi. (Basu 2015, 7; Huhtinen et al. 2000, 160.)

Polttoaine syötetään tulipesän alaosaan kattilan etuseinältä tai syklonista palaavan hiekan joukkoon laskuputkeen. Kerrosleijukattilan tapaan primääri-ilma toimii leijutusilmana ja se tuodaan tulipesään ilmanjakoarinnan suuttimista. Palamisen loppuun saattamiseksi sekundääri-ilma tuodaan tulipesään korkeammalta tasolta. Ilmaa syötetään myös hiekkalukkoon, joka saa hiekan liikkumaan laskuputkeen tulipesää kohti. Hiekkalukon tehtävänä on estää savukaasujen virtaus tulipesän alaosasta sykloniin. (Basu 2015, 7; Huhtinen et al. 2000, 160–162; Zhang ja Teir 2003, 157–158.)

2.3 Perinteinen ajotapa ja säätökyky

CHP-laitoksien ensisijainen tehtävä on lämmöntarpeen täyttäminen, jonka seurauksena laitoksia ajetaan lämpökuorman mukaan. Teollisuuden vastapainevoimalaitokset seuraavat teollisuuden lämpökuormaa ja kaukolämpövoimalaitokset seuraavat kaukolämpökuormaa. Sähköntuotanto on sidottu lämpökuormaan, jolloin sähköä saadaan voimalaitoksen rakennusasteen mukaisesti. Kaukolämmön tuotannossa CHP-laitoksilla ajetaan tyypillisesti pohjakuormaa. Vastapainevoimalaitoksilla säädetään sähköjärjestelmää suhteellisen vähän. Sääto toteutetaan lähinnä vesivoimalla ja tuonnilla tai viennillä. Muuttunut sähkömarkkina-tilanne ja sähköjärjestelmän kaipaama jousto kuitenkin kannustavat CHP-laitoksien sähköntuotannon säätökyvyn kehittämiseen.

Lämpöteholtaan pienemmissä CHP-laitoksissa prosessikytkennät ovat taloudellisista syistä yksinkertaisia ja rakennusaste on matala. Lämpötehon kasvaessa prosessikytkentää voidaan monimutkaistaa. Rakennusastetta ja sähköntuotannon hyötysuhdetta voidaan kasvattaa lisäämällä prosessiin esimerkiksi kaukolämpöveden monivaiheinen lämmitys, syöttöveden esilämmitys väliottohöyryllä ja höyryn välitulistus. (Huhtinen et al. 2013, 46–47.)

Sähköntuotannon riippuvuutta lämpökuormasta voidaan vähentää kaukolämpöveden apujäähdyttimen, kaukolämpöakun tai lauhdeturbiinin avulla. Kaukolämpöveden apujäähdyttimen avulla voimalaitoksen kaukolämpötehoa voidaan kasvattaa kaukolämpökuormaa suuremmaksi, jolloin saadaan tuotettua enemmän sähköä. Apujäähdyttimen avulla ylimääräinen lämpöteho tai kaukolämmön paluuveden lämpöä johdetaan vesistöön. Apujäähdytin on edullinen ja yksinkertainen ratkaisu, mutta lämpöä ja täten polttoainetta hukataan. Apujäähdytintä käytetään tavallisesi kevään ja syksyn välisenä aikana. (Huhtinen et al. 2013, 56.)

Apujäähdyttimen tapaan kaukolämpöakun avulla voimalaitoksen lämpötehoa voidaan kasvattaa lämpökuormaa suuremmaksi, jolloin saadaan tuotettua enemmän sähköä. Ylimääräinen lämpö varastoidaan lämpöakkuun ja puretaan esimerkiksi kaukolämmön kulutushuipujen aikaan. Lämpöakku soveltuu esimerkiksi vuorokauden sisäiseen kulutuksen tasaamiseen. Lämpöakku on kalliimpi investointi apujäähdyttimeen verrattuna, mutta lämpö saadaan talteen. Kaukolämpöakut ovat tyypillisesti vedellä täytettyjä terässäiliöitä. (Huhtinen et al. 2013, 57.)

Sähköntuotantoa voidaan kasvattaa myös lisäämällä vastapaineturbiinin perään lauhdeturbiini, jota kutsutaan myös lauhdeperäksi ja lauhdehännäksi. Matalapaineturbiini ja lauhdutin tekevät lauhdeturbiinista kuitenkin kalliin investoinnin apujäähdyttimeen ja kaukolämpöakkuun verrattuna. Tämän seurauksena investoinnin kannattavuus edellyttää lauhdeturbiinin lähes jatkuvaa käyttöä ja korkeaa sähkön hintaa. Mikäli lauhdesähkön tuotanto ei ole kannattavaa, lauhdeturbiini tulisi kyetä kytkemään irti vastapaineturbiinista ja generaattorista akselissa olevalla kytkimellä. Mikäli tämä ei onnistu, lauhdeturbiini pyörii vastapaineturbiinin tahtiin vaikei sillä tuotettaisi sähköä, jolloin turbiinin joudutaan johtamaan jatkuvasti jäähdytyshöyryä. (Huhtinen et al. 2013, 58.)

2.4 CHP-laitosten toimintaympäristö

CHP-laitokset toimivat monipuolisessa ympäristössä. Käytännössä lämmöntarve ei pysy vakiona, vaan vaihtelee jatkuvasti jonkin verran. Teollisuudessa lämpökuorma on vuoden sisällä suhteellisen tasainen, mutta esimerkiksi nopeat lyhyen aikavälin vaihtelut ovat mahdollisia. Kaukolämpökuormalle on ominaista suuret kausittaiset vaihtelut, koska kuorma vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Kaukolämpökuorma vaihtelee myös vuorokauden sisällä ollen päivällä suurempi kuin yöllä. Lämmön hinta pysyy sähköön verrattuna tasaisena.

Sähkömarkkinat ovat moniulotteinen, haastava ja huomattavasti laajempi toimintaympäristö. Sähkömarkkinat voidaan jakaa johdannaismarkkinoihin, vuorokausimarkkinoihin, päivänsisäisiin markkinoihin, säätösähkö- ja reservimarkkinoihin sekä taseselvitykseen (Fingrid Oyj 2022a). Sähkömarkkinoilla hinta määräytyy markkinaehtoisesti kysynnän ja tarjonnan mukaan. Tuotettu sähkö voidaan toimittaa suoraan kuluttajalle, kuten teollisuudelle, tai myydä vaihtoehtoisesti sähköpörssiin. Lisäksi varttitaseeseen siirtyminen tulee osaltaan vaikuttamaan sähkömarkkinoiden luonteeseen.

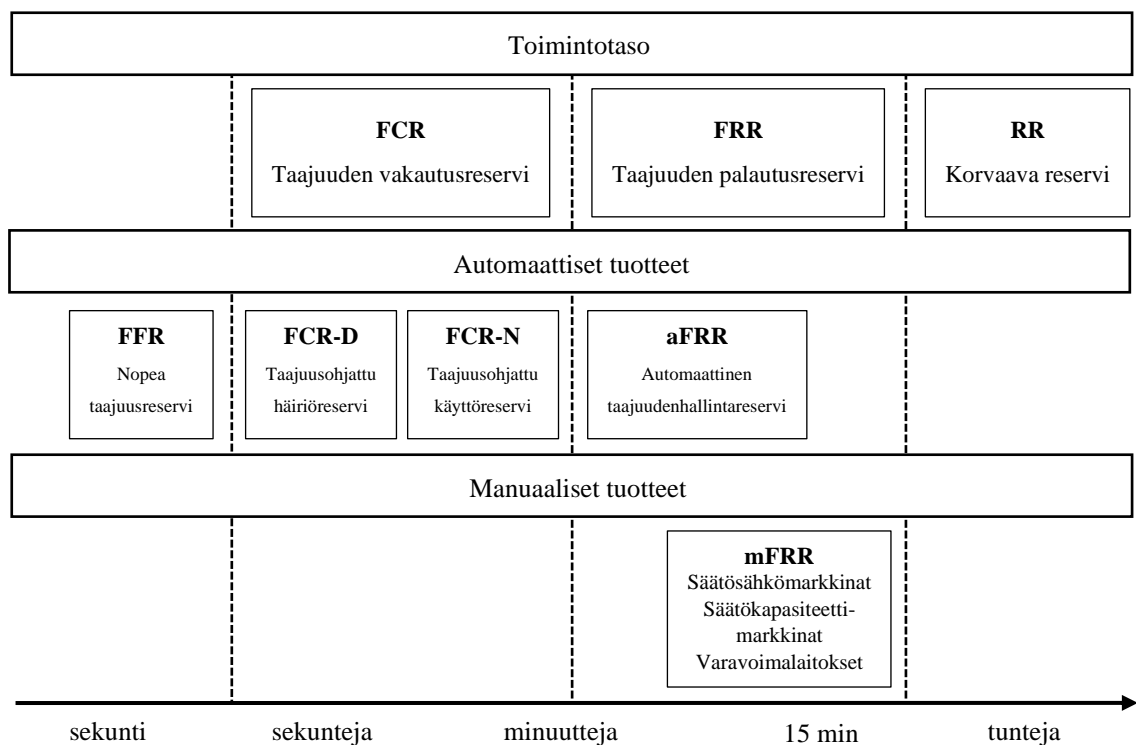
Hintavolatiliteetti on ominainen piirre sähkömarkkinoille. Sähkön hintavolatiliteettiin vaikuttavat esimerkiksi säästä riippuvat sähköntuotantomuodot, kuten tuuli- ja aurinkovoima. Tuuli- ja aurinkovoimatuotannon ennustetaan kasvavan merkittävästi (Vakkilainen ja Hypänen 2022, 18). Tuulivoimatuotannon on todistettu korreloivan melko hyvin sähkön hinnan kanssa. Tyypillisesti tuulivoimatuotannon ollessa suurta sähkö on edullista ja vastaavasti tuulivoimatuotannon ollessa pientä sähkö on kalliimpaa. Lisääntyvä aurinkovoimakapasiteetti tulee luultavasti vaikuttamaan sähkön hintaan vastaavalla tavalla.

Tuulivoimakapasiteetti on kasvanut voimakkaasti 2010-luvun alusta lähtien ja oli vuoden 2022 lopussa 5 677 MW. Tuulivoimakapasiteetti kasvoi vuonna 2022 peräti 2 430 MW. Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan marraskuussa 2022 suunniteltuja maatuulivoimahankkeita oli 52 920 MW ja merituulivoimahankkeita 13 025 MW. (Suomen Tuulivoimayhdistys ry 2023.) Fingridin arvion mukaan Suomessa tulee olemaan vuonna 2025 lähes 10 000 MW tuulivoimakapasiteettia ja 2030-luvulla jopa 20 000 MW (Fingrid Oyj 2022c).

Aurinkovoiman tuotanto on Suomessa toistaiseksi melko vähäistä, mutta teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden ennustetaan yleistyvän. Fingridin aurinkovoimaennusteessa käytetty kokonaiskapasiteetti on tällä hetkellä noin 700 MW (Fingrid Oyj 2023). Kapasiteetin kasvu on ollut viime vuosina noin 80–90 MW. Teollisen kokoluokan aurinkovoimaloiden yleistyessä kapasiteetin odotetaan kasvavan nopeasti. Esimerkiksi Tanskassa ja Ruotsissa kapasiteetin nopea kasvu on jo alkanut. (Ahola 2022, 29.) Useista suunnitelmista tai investoinneista suuren kokoluokan aurinkovoimaloihin on uutisoitu myös Suomessa viime aikoina.

Fingrid ylläpitää reservimarkkinoita. Reservien avulla hallitaan sähköjärjestelmän tehotasapainoa. Reservejä ovat voimalaitokset, energiavarastot ja kulutuskohteet, jotka kykenevät muuttamaan tehoaan tarpeen vaatiessa. Kuvassa 8 on esitetty reservituotteet. Taajuuden vakautusreservien (FCR) tehtävä on taajuuden jatkuva hallinta. Taajuuden palautusreservien (FRR) avulla taajuus palautetaan normaalille alueelle, eli 49,9–50,1 Hz. Lisäksi taajuuden palautusreservit vapauttavat aktivoituneet taajuuden vakautusreservit. Korvaavien reservien (RR) avulla varaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin uusiin häiriöihin vapauttamalla aktivoituneet taajuuden palautusreservit. Korvaavia reservejä ei ole tällä hetkellä käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. Pohjoismaissa on käytössä myös nopea taajuusreservi (FFR), jonka tehtävä on taajuuden hallinta pienen inertian tilanteissa. (Fingrid Oyj 2022b.)

Automaattisesti aktivoituvat taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) ja taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ovat taajuuden vakautusreservejä. Taajuuden palautusreservejä ovat automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) ja manuaalisesti aktivoitava taajuuden palautusreservi (mFRR). Manuaaliseen taajuuden palautusreserviin kuuluvat säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinoilta hankittu kapasiteetti sekä varavoimalaitokset. (Fingrid Oyj 2022b.)



Kuva 8. Reservituotteet (mukaillen Fingrid Oyj 2022b).

Pohjolan Voiman tapauksessa lämpö ja sähkö toimitetaan osakkaille mankala-periaatteen mukaisesti omakustannushintaan. Täten osakkaille omakustannushintaan toimitetusta lämmöstä ja sähköstä ei saada taloudellista voittoa. Voittoa saadaan myymällä sähköä pörssiin tai osallistumalla säätösähkö- ja reservimarkkinoille. Edellä mainituissa tapauksissa laitoksen hyvä säätökyky ja joustavuus ovat avaintekijöitä.

2.5 Pohjolan Voiman CHP-laitokset

Tässä tutkimuksessa on mukana neljä Pohjolan Voiman CHP-laitosta. Laitokset ovat Kaukaan Voima, Kymin Voima, Porin Prosessivoima ja Rauman Biovoima. Kaikki laitokset tuottavat teollisuudelle prosessihöyryä, kaukolämpöä paikalliseen kaukolämpöverkkoon sekä sähköä.

Kaukaan Voima on Lappeenrannassa UPM Kaukaan tehdasalueella sijaitseva biovoimalaitos. Laitos tuottaa prosessihöyryä UPM Kaukaan tarpeisiin, kaukolämpöä Lappeenrannan Energialle sekä sähköä. Polttoaineenaan laitos käyttää kuorta, hakkuutähdettä, muita puuperäisiä polttoaineita sekä turvetta. Laitos otettiin käyttöön vuonna 2009, sen lämpöteho on 262 MW ja sähköteho 125 MW. (Pohjolan Voima Oyj 2023b.)

Kymin Voima on Kouvolassa Kuusankoskella UPM Kymin tehdasalueella sijaitseva biovoimalaitos. Laitos tuottaa prosessihöyryä UPM Kymin tarpeisiin, kaukolämpöä KSS Energialle sekä sähköä. Pääpolttoaineenaan laitos käyttää metsäteollisuuden sivuvirtoja, kuten kuorta. Lisäksi polttoaineena käytetään turvetta ja muita puuperäisiä polttoaineita. Laitos otettiin käyttöön vuonna 2002, sen lämpöteho on 180 MW ja sähköteho 76 MW. (Pohjolan Voima Oyj 2023b.)

Porin Prosessivoima on Porin Kaanaan tehdasalueella sijaitseva voimalaitos. Laitos tuottaa prosessihöyryä alueen teollisuudelle, kaukolämpöä Porin Energialle sekä sähköä. Laitos käyttää polttoaineenaan puuperäisiä polttoaineita, kierrätyspolttoaineita (SRF), turvetta ja kivihiiltä. Laitos otettiin käyttöön vuonna 2008, sen lämpöteho on 212 MW ja sähköteho 65 MW. (Pohjolan Voima Oyj 2023b.)

Rauman Biovoima on Raumalla UPM Rauman tehdasalueella sijaitseva biovoimalaitos. Laitos tuottaa prosessihöyryä UPM Rauman tarpeisiin, kaukolämpöä Rauman Energialle sekä sähköä. Laitos käyttää polttoaineenaan kierrätyspuuta, kuorta, hakkuutähdettä, biolietettä, kierrätyspolttoaineita (SRF) sekä varapolttaineena turvetta. Laitos otettiin käyttöön vuonna 2006, sen lämpöteho on 190 MW ja sähköteho 65 MW. (Pohjolan Voima Oyj 2023b.)

3 Power-to-Heat - sähköllä lämpöä

Power-to-X (PtX, P2X) käsitteellä viitataan teknologioihin, joiden avulla sähköä muutetaan toiseen muotoon. Ajatuksena on hyödyntää uusiutuvien tuotantomuotojen, kuten tuuli- ja aurinkovoiman tuottamaa ylimääräistä ja edullista sähköenergiaa. Power-to-heat (PtH, P2H) ratkaisuihin sähköenergia muutetaan lämpöenergiaksi (Maruf et al. 2022, 2). Schuwer ja Schneider (2018, 412) esittävät useita power-to-heat teknologioita teollisuudelle. Tässä työssä keskitytään sähkökattiloihin ja kompressiolämpöpumppuihin. Power-to-heat teknologiaa hyödynnetään myös joissakin lämpövarastoissa.

Muuttuneen sähkömarkkinatilanteen ja lisääntyvän tuuli- ja aurinkovoimatuotannon seurauksena sähkö on ajoittain hyvin edullista, joka on herättänyt paljon keskustelua power-to-heat teknologioiden potentiaalista ja lämmöntuotannon sähköistymisestä. Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen määrän ennustetaan kasvavan merkittävästi (AFRY Management Consulting Oy 2023, 26). Power-to-heat teknologiat ovat herättäneet kiinnostusta myös siksi, että niiden integrointi osaksi muuta energiantuotantoa, kuten CHP-laitosta, kasvattaa järjestelmän joustavuutta. Jos järjestelmään lisätään vielä lämpövarasto, joustavuus kasvaa entisestään. (Maruf et al. 2022, 2.) Lisäksi teknologiat tarjoava mahdollisuuden säätösähkö- ja reservimarkkinoille osallistumiseen.

Teollisen kokoluokan lämpöpumput ovat yleistyneet lämmöntuotannossa jo jotakin vuosia sitten. Sähkökattilat ovat vasta muutaman viimeisen vuoden aikana herättäneet suurta kiinnostusta ja useita investointeja on julkistettu Suomessakin (EPV Energia Oy 2023; Tampereen Sähkölaitos Oy 2022; PARAT Halvorsen AS 2023). Sähkökattiloita on kuitenkin aikaisemminkin käytetty lämmöntuotannossa, mutta ei kovin laajasti. Nyt toimintaympäristö on muuttunut suotuisammaksi sähkökattiloiden laajemmalle käytölle.

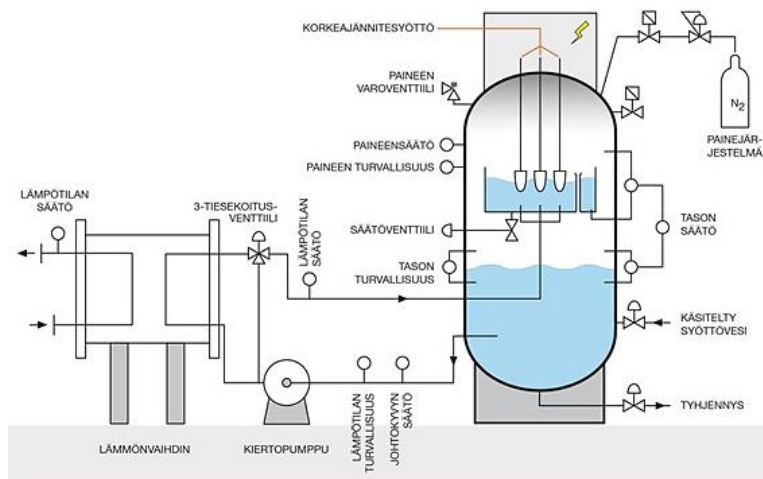
Sähkökattilalta ja lämpöpumpulta vaaditaan megawattien tehoa ja kykyä tuottaa riittävän korkea lämpötilataso, jos niitä käytetään suoraan lämmöntuotannossa. Kaukolämmön tuotantoon riittää noin 70–120 °C lämpötilataso, mutta prosessihöyryn tuottamiseen vaaditaan noin 110–200 °C lämpötilataso. (Aittomäki et al. 2012, 336; Wikstén 1998, 77.) Toisaalta, jos esimerkiksi lämpöpumppua käytetään esilämmitystarpeisiin, kuten kaukolämmön paluuvien esilämmittämiseen, voivat matalammat tehot ja lämpötilatasot olla riittäviä.

3.1 Sähkökattilat

Sähkökattiloita voidaan käyttää teollisuudessa kuuman veden tai höyryn tuotantoon. Tyypillisiä ratkaisuja ovat vastus- ja elektrodikattilat, mutta pienessä mittakaavassa on myös infrapuna- ja induktioteknologiaan perustuvia ratkaisuja. Sähkökattiloiden hyötysuhde on korkea, tavallisesti jopa 99 %. Esimerkiksi norjalainen PARAT Halvorsen AS ja ruotsalainen Zander & Ingeström valmistavat vastus- ja elektrodikattiloita. (Danish Energy Agency 2016, 306, 309, 312; Maruf et al. 2022, 6.)

Vastuskattilan toiminta perustuu lämmityselementin sähköiseen resistanssiin, eli kykyyn vastustaa sähkövirran kulkua. Lämmityselementti toimii siis vastuksena ja resistanssin seurauksena sähkövirta muuttuu lämmöksi. Täten, kun veteen upotettuun lämmityselementtiin johdetaan sähköä, se lämmittää ympärillään olevaa vettä. Vastuskattilat kytketään tavallisesti pienjännitetasolle, kuten 400 tai 690 volttiin. Vastuskattiloiden teho on kilowateista muutamaan megawattiin. (Danish Energy Agency 2016, 306, 308; Maruf et al. 2022, 6, 8.)

Kuvassa 9 on esitetty elektrodikattila kuuman veden tuotantoon. Elektrodikattilan toiminta perustuu elektrodien välissä olevan veden ominaisuuksiin, kuten sähköjohtokykyyn ja resistiivisyyteen (Maruf et al. 2022, 6). Kun elektrodeihin syötetään virtaa, veteen upotettujen elektrodien välissä oleva vesi synnyttää ohmisen vastuksen niiden välille, joka synnyttää lämpöä. Elektrodit on ripustettu kattilan yläosaan ja astia on paineistettu tyypellä. (Danish Energy Agency 2016, 307; PARAT Halvorsen AS 2022.)



Kuva 9. Elektrodikattila kuuman veden tuotantoon (PARAT Halvorsen AS 2022).

Elektrodikattilan lämpötehoa voidaan säätää muuttamalla veden virtausta elektrodien läpi ja elektrodeihin syötettävää sähkövirtaa. Veden sähkönjohtokykyä valvotaan jatkuvasti optimaalisen toiminnan varmistamiseksi. Elektrodikattilat kytketään tavallisesti keskijännitetasolle, kuten 10–15 kilovolttiin ja niiden teho on muutamasta megawatista useisiin kymmeneen megawatteihin. (Danish Energy Agency 2016, 306–308.) Elektrodikattilat ovat kompaktin kokoisia, sillä esimerkiksi 45 MW:n kuumavesikattilan halkaisija on 3 100 mm ja korkeus 6 400 mm. (PARAT Halvorsen AS 2022.)

Sähkökattiloiden etuja ovat korkea hyötysuhde, yksinkertainen ja kompakti rakenne, alhainen investointikustannus, helppo huollettavuus, hyvä ja nopea säädettävyys, nopea käynnistys, alhainen melutaso, eivätkä ne aiheuta paikallisia päästöjä. Sähkökattiloiden heikkoutena voidaan pitää käyttökustannuksien vahvaa riippuvuutta sähkön hinnasta. Tämän seurauksena sähkökattilan käyttö rajoittuu käytännössä sähkön edullisille tunneille. (Danish Energy Agency 2016, 308, 311; Maruf et al. 2022, 3.) Taulukossa 1 on esitetty esimerkkiarvoja vastus- ja elektrodikattiloille kuuman veden ja höyryn tuotantoon.

Taulukko 1. Esimerkkiarvoja vastus- ja elektrodikattiloille kuuman veden ja höyryn tuotantoon (Danish Energy Agency 2020; PARAT Halvorsen AS 2022).

Sähkökattilan tyyppi	Vastuskattila	Elektrodikattila
Lämpöteho [MW]	0,3–5	5–60
Hyötysuhde [%]	99	99
Tekninen käyttöikä [vuotta]	25	25
Investointikustannus [€/kW]*	190–210	80–100
Kiinteät k&k [€/MW/vuosi]**	1070–1230	960–1110
Muuttuvat k&k [€/MWh]	0,5–0,6 + sähkö	0,5 + sähkö

* Sisältää laitteiston ja asennuksen.

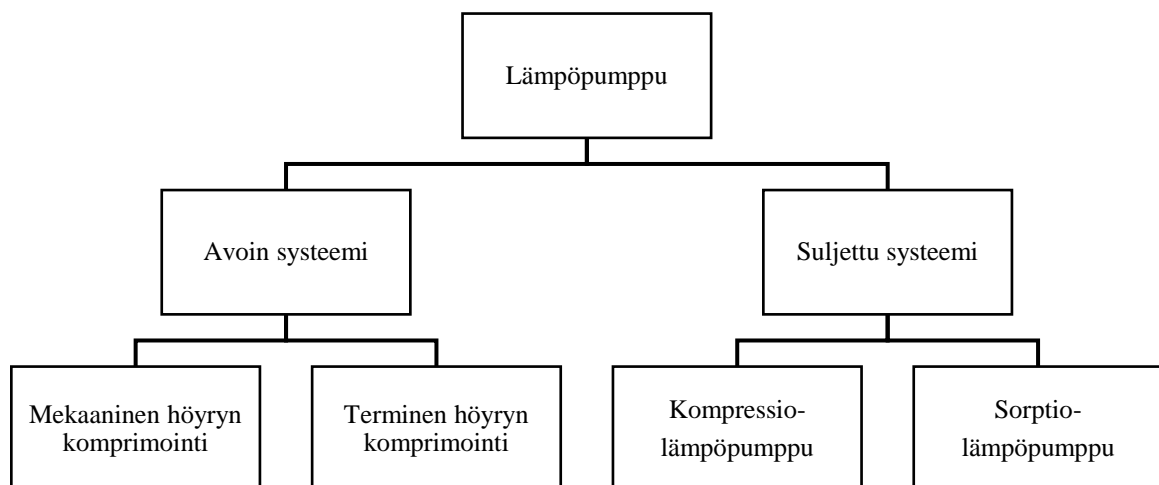
** k&k = käyttö- ja kunnossapitokustannukset.

Sähkökattiloiden säätöalue on laaja, sillä minimikuorma on 5 % täydestä kuormasta. Myös säätönopeus on erinomainen, sillä valmiustilasta päästään täyteen tehoon noin 30 sekunnissa ja kylmästä tilasta noin 5 minuutissa. (Danish Energy Agency 2016, 308, 312; PARAT Halvorsen AS 2022.) Tämä luo hyvät valmiudet säätösähkömarkkinoille osallistumiseen. Säätösähkömarkkinoille osallistumisen hyötyjä ei kuitenkaan tarkastella tässä työssä.

3.2 Lämpöpumput

Lämpöpumpulla siirretään lämpöä kylmästä lämpövarastosta kuumaan lämpövarastoon nostamalla lämmön lämpötilatasoa. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämmön siirtyminen kylmästä lämpövarastosta kuumaan lämpövarastoon ei ole mahdollista ilman ulkoista työtä. (Wikstén 1998, 135–136.) Ulkoinen työ voi olla systeemiin tehtyä mekaanista työtä tai systeemiin tuotua lämpöenergiaa.

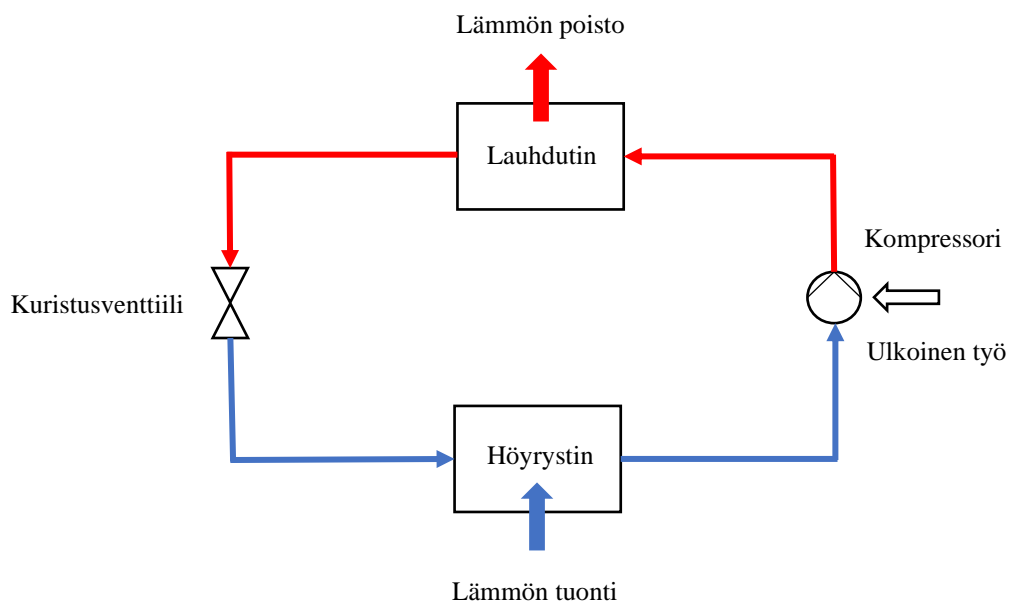
Lämpöpumput voidaan luokitella kuvan 10 mukaisesti avoimiin ja suljettuihin systeemeihin. Mekaaninen ja terminen höyryn komprimointi ovat avoimia systeemejä, kun taas mekaaniset kompressiolämpöpumput ja lämpöenergialla toimivat sorptiolämpöpumput ovat suljettuja systeemejä. Edellä mainittujen systeemien yhdistelmät ovat myös mahdollisia. Kompressiolämpöpumput toimivat sähköllä ja ovat yleisimmin käytetty teknologia, jonka vuoksi tässä työssä keskitytään kyseiseen lämpöpumpputyyppiin. (Arpagaus et al. 2018, 986–987; Maaskola ja Kataikko 2014, 16.)



Kuva 10. Lämpöpumppujen luokittelu (mukaiillen Arpagaus et al. 2018, 987).

Kompressiolämpöpumpun toiminta perustuu käänteiseen Clausius-Rankine-prosessiin, eli kylmähöyryprosessiin. Yksinkertaisimmillaan kompressiolämpöpumppu koostuu höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta ja kuristusventtiilistä (kuva 11). Höyrystimessä kiertoineeseen tuodaan lämpöä kylmästä lämpövarastosta, jolloin kiertoaine höyrystyy.

Höyrystimen jälkeen kiertoaine puristetaan kompressorilla korkeaan paineeseen, jolloin kiertoaineen lämpötila myös kasvaa. Kompressorin jälkeen kiertoaine lauhtuu lauhduttimessa ja luovuttaa lämpöä kuumaan lämpövarastoon. Lauhduttimelta kiertoaine virtaa kuristusventtiilin läpi, jolloin kiertoaineen paine laskee lähtötasolle ja kierto sulkeutuu. (Adamson et al. 2022, 2–3; Wikstén 1998, 137–140.) Kylmällä lämpövarastolla tarkoitetaan lämmönlähdettä ja kuumalla lämpövarastolla lämmön käyttökohdetta.



Kuva 11. Yksinkertainen kompressiolämpöpumpppu-prosessi.

Lämpöpumppujen tehokkuutta kuvataan lämpökertoimella, eli COP:lla (engl. Coefficient Of Performance). Lämpökerroin määritellään systeemistä saadun lämmön ja systeemiin tehdyn työn suhteena

$$\varepsilon_L = \frac{Q_{\text{ulos}}}{W_{\text{sisään}}} \quad (2)$$

jossa ε_L on lämpökerroin, Q_{ulos} on lämpöpumpusta hyödyksi saatu lämpöenergia [J] ja $W_{\text{sisään}}$ on systeemiin tehty työ [J]. (Aittomäki et al. 2012, 5, 336–337; Wikstén 1998, 136.)

Kompressiolämpöpumpun tapauksessa systeemiin tehdyllä työllä tarkoitetaan lämpöpumpun, lähinnä kompressorin kuluttamaa sähköä. Jos COP saa esimerkiksi arvon 3, saadaan lämpöenergiaa kolminkertainen määrä kulutettuun sähköenergiaan nähden. Lämpöpumpun nimellinen COP määritellään standardin mukaisissa olosuhteissa. Käytännössä COP ei pysy vakiona, vaan muuttuu jatkuvasti olosuhteiden mukaisesti lämpöpumpun toiminnan aikana.

Ideaalisen Carnot-lämpöpumpun prosessin lämpökerroin määritellään systeemistä poistetun lämmön ja systeemiin tuodun lämmön lämpötilojen avulla

$$\varepsilon_{\text{Carnot}} = \frac{T_{\text{ulos}}}{T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}}} \quad (3)$$

jossa T_{ulos} on systeemistä poistetun lämmön lämpötila [K] ja $T_{\text{sisään}}$ on systeemin tuodun lämmön lämpötila [K] (Wikstén 1998, 137).

Yhtälön 3 mukaisesti lämpöpumpun COP riippuu tuotetun lämmön ja lämmönlähteen lämpötiloista. Lämpöpumpun COP laskee lämpöpumpulta vaadittavan lämpötilannoston ($\Delta T_{\text{nosto}} = T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}}$) kasvaessa. Todellisten lämpöpumpujen COP (yhtälö 2) on noin 40–60 % ideaalisen lämpöpumpun prosessin COP:sta. (Adamson et al. 2022, 4; Arpagaus et al. 2018, 987, 993, 996.) Arpagaus et al. (2018, 993, 996) analysoimien teollisuuslämpöpumpujen keskimääräinen COP oli 3,3 keskimääräisen lämpötilannoston ollessa 61 kelviniä.

Perinteiset lämpöpumput kykenevät tuottamaan noin 80–90 °C lämpötilatason. Viime vuosina yleistyneet kuumalämpöpumput (engl. High Temperature Heat Pump, HTHP) kykenevät tuottamaan parhaimmillaan jopa 120–165 °C lämpötilatason. Korkeat lämpötilat soveltuvat esimerkiksi matalapaineisen höyryn tuotantoon. Kuumalämpöpumppuja nimitetään myös teollisuuslämpöpumpuiksi. (Arpagaus et al. 2018, 986, 991–992; Kosmadakis 2019, 288–289.)

Taulukossa 2 on esitetty esimerkkiarvoja perinteiselle lämpöpumpulle ja kuumalämpöpumpulle. Perinteisten lämpöpumpujen teho on parhaimmillaan muutamia kymmeniä megawatteja, kun taas kuumalämpöpumpujen teho vaihtelee kymmenistä kilowateista muutama megawattiin (Arpagaus et al. 2018, 991–992; Calefa Oy 2023; Friotherm AG 2023; Oilon Group Oy 2023). Suurissa sovelluskohteissa rakenne on tyypillisesti modulaarinen, jolloin on mahdollista saavuttaa suurempiakin tehoja. Lämpöpumpun investointikustannukseen vaikuttaa esimerkiksi lämmönlähde, tuotettu lämpötilataso sekä teho. Kalliita materiaaleja vaativat lämmönlähteet ja monimutkaiset kytkennät nostavat investointikustannuksia.

Taulukko 2. Esimerkkiarvoja lämpöpumpuille (Calefa Oy 2023; Danish Energy Agency 2020; Friotherm AG 2023; Oilon Group Oy 2023).

Lämpöpumpun tyyppi	Normaali lämpöpumppu	Kuumalämpöpumppu
Lämpötilataso [°C]	80–90	120–130
Lämpöteho [MW]	< 20	< 1,5
COP nimellisteholla	3–4	2–3,5
Tekninen käyttöikä [vuotta]	20	20
Investointikustannus [€/kW]*	730	870
Kiinteät k&k [€/MW/vuosi]	2000	2000**
Muuttuvat k&k [€/MWh]	1,8 + sähkö	1,8 + sähkö

* Sisältää laitteiston ja asennuksen.

** Oletettu samaksi kuin perinteisellä lämpöpumpulla. Danish Energy Agencyn katalogin arvo on 970 €/MW, mutta ei selvää näyttöä miksi olisi puolet pienempi.

Lämpöpumppujen vahvuuksia ovat niiden tehokkuus, matalat tuotantokustannukset, suhteellisen nopea käynnistysaika, hyvä säädettävyyden, modulaarinen rakenne ja ne eivät tuota paikallisia päästöjä. Lämpöpumpun minimikuorma on noin 10–25 % täydestä kuormasta, lämmin käynnistysaika on noin 15 minuuttia ja kylmä noin 60 minuuttia (Danish Energy Agency 2020). Lisäksi lämpöpumpuilla on mahdollista hyödyntää matalalämpöisiä hukkalämpövirtoja, jotka muuten jäisivät hyödyntämättä (Danish Energy Agency 2016, 291).

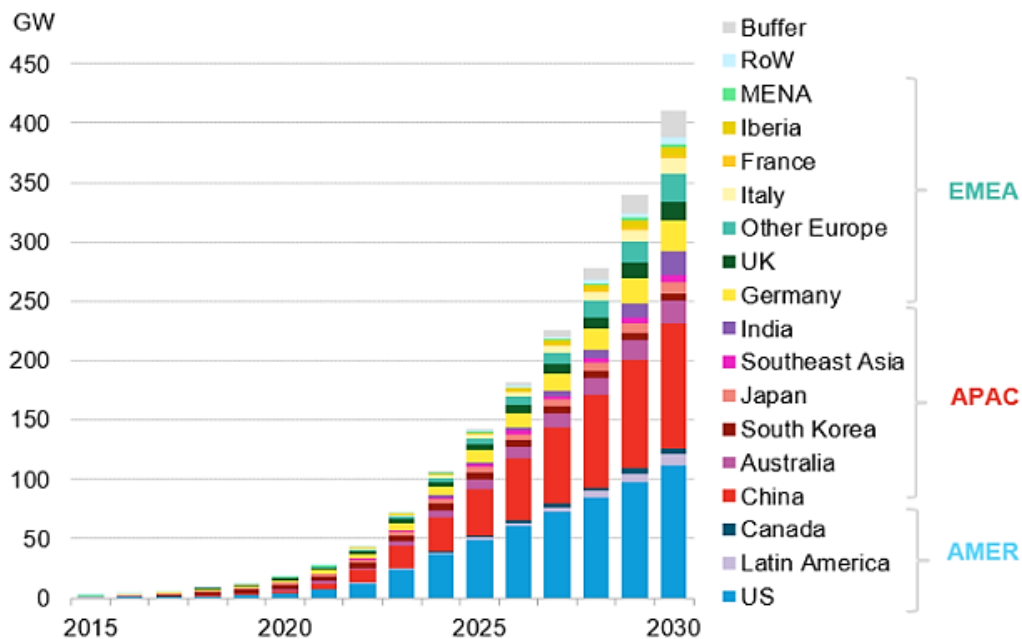
Lämpöpumppujen heikkous sähkökattiloihin verrattuna on huomattavasti korkeampi investointikustannus. Lämpöpumpulla on myös rajoitteita tuotetun lämmön lämpötilatasossa, jonka lisäksi ne tarvitsevat pysyvän ja riittävän suuritehoisen lämmönlähteen. (Danish Energy Agency 2016, 291–292.) Lämmönlähde voi olla esimerkiksi ulkoilma, ympäristön vesistö tai jokin hukkalämpövirta (Aittomäki et al. 2012, 350–355).

Lämpöpumppujen kehitys on keskittynyt viime vuosina korkeamman lämpötilatason saavuttamiseen, tehokkuuden parantamiseen ja uusien ympäristöystävällisempien kiertoaineiden kehittämiseen (Arpagaus et al. 2018, 996). IAE:n (International Energy Agency) lämpöpumppuohjelma Annex 58 keskittyy kuumalämpöpumppujen teknologioihin ja markkinatilanteeseen. Sen mukaan markkinoille on lähivuosina odotettavissa entistä korkeampia lämpötiloja tuottavia lämpöpumppuja. (IEA 2022c.) Tämä mahdollistaa lämpöpumppujen laajemman hyödyntämisen erilaisissa sovelluskohteissa teollisuudessa. Teknologioissa on kuitenkin mukana muitakin lämpöpumpputyyppejä kuin kompressiolämpöpumppuja.

4 Energiavarastot

Energiavarasto on systeemi, joka varastoi energiaa sisäisen, kineettisen tai potentiaalienergian muodossa. Energian varastointi koostuu kolmesta prosessista: energian lataamisesta varastoon, energian varastoinnista ja energian purkamisesta varastosta. (Stern ja Bauer 2019, 24.) Keskustelu energian varastoinnin tärkeydestä ja roolista energiajärjestelmässä on käynyt kiivaana esimerkiksi säästä riippuvien tuotantomuotojen lisääntyessä. Energian tuotanto ja kulutus eivät aina kohtaa ajallisesti, jonka vuoksi tarvitaan varastoja.

BloombergNEF:n arvion mukaan maailmanlaajuinen energiavarastojen asennettu tehokapasiteetti kasvaa hieman yli 400 gigawattiin vuoden 2030 loppuun mennessä. Akkujen odotetaan hallitsevan markkinoita ainakin 2030-luvulle asti. Arvio ei sisällä pumppuvesivarastoja. (BloombergNEF 2022a.) Kuvassa 12 on esitetty BloomberNEF:n arvio asennettun tehon kehityksestä.



Kuva 12. Energiavarastojen asennettun tehon globaali kumulatiivinen kehitys 2015–2030 (Buffer, tapaukset, joiden ennustamiseen liittyy epävarmuutta. RoW, muu maailma. MENA, Lähi-itä ja Pohjois-Afrikka. EMEA, Eurooppa, Lähi-itä ja Afrikka. APAC, Aasian ja Tyynenmeren alue. AMER, Amerikka) (BloombergNEF 2022a).

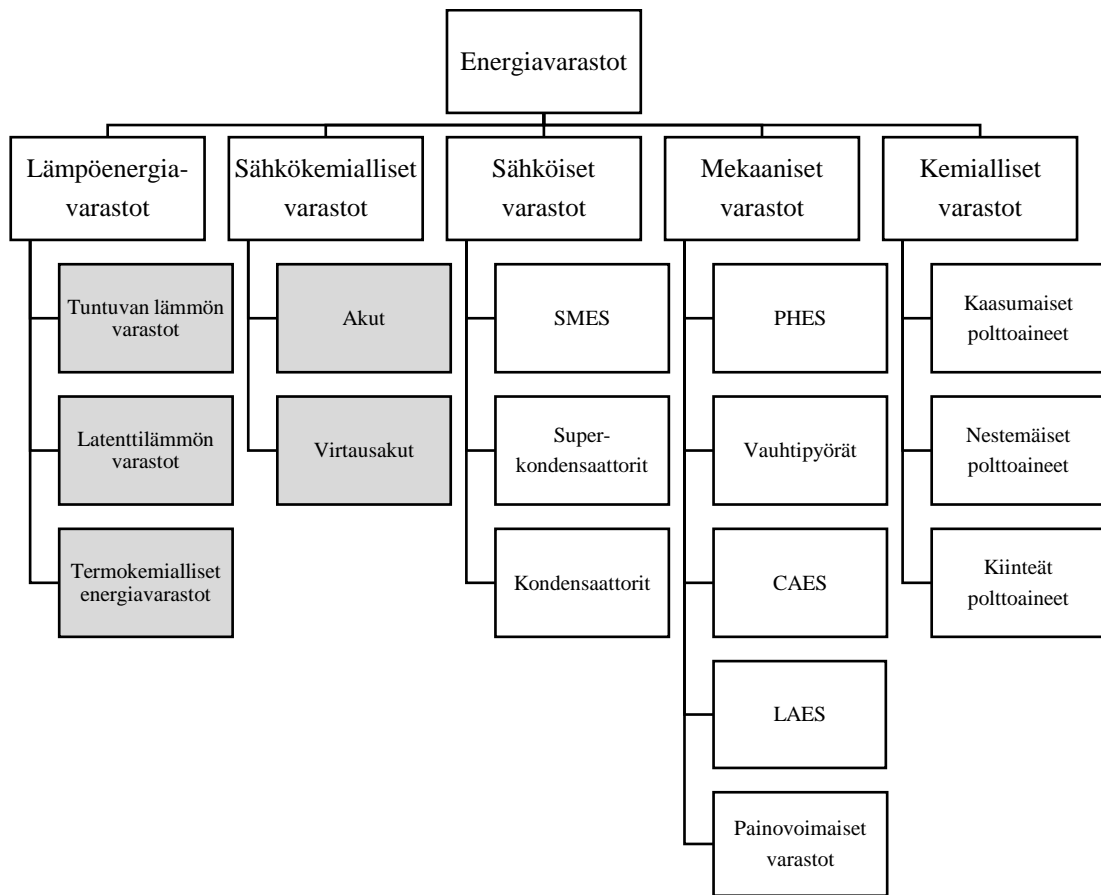
Energian varastoinnille on lukuisia sovelluskohteita, joita esittävät tutkimuksissaan esimerkiksi Argyrou et al. (2018), Koochi-Fayegh ja Rosen (2020), Zhang et al. (2021), Grönman et al. (2022) ja Kebede et al. (2022). Energiavarastoja käytetään pääasiassa tuotannon ja kulutuksen ajalliseen tasapainottamiseen. Tällöin energiaa varastoidaan kulutuksen ollessa matalaa ja varastoa puretaan kulutuksen ollessa suurempaa. Energiavarastoja voidaan käyttää myös esimerkiksi sähköjärjestelmän tukemiseen, kuten taajuuden ja jännitteen hallintaan. (Sterner ja Bauer 2019, 30; U.S. Department of Energy 2021.)

Tässä luvussa käsitellään energian varastointiteknologioita aluksi yleisellä tasolla teknologioiden luokittelun perusteella. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin lämpö- ja sähköenergian varastointiteknologioita, joiden integrointi osaksi CHP-laitosta katsotaan järkeväksi. Työssä ei käsitellä yksityiskohtaisesti kaikkien varastointiteknologioiden toimintaperiaatteita. Tarkoituksena on antaa yleiskuva eri teknologioista ja käsitellä tarkemmin vain tiettyjä teknologioita.

4.1 Energian varastointiteknologiat

Energian varastointiteknologiat voidaan luokitella usealla tavalla. Yleisin tapa on luokitella teknologiat varastoidun energian muodon mukaan lämpöenergia-, sähkökemiallisiin, sähköisiin, mekaanisiin ja kemiallisiin varastoihin. Muita tapoja ovat esimerkiksi luokittelu varastointiajan, tehon, kapasiteetin tai teknologian kypsyyssasteen mukaan. (Sterner ja Bauer 2019, 33–36; World Energy Council 2016, 9.)

Lämpöenergian varastointiteknologioihin kuuluvat tuntuva lämmön varastot, latenttilämmön varastot sekä termokemialliset energiavarastot. Sähkökemiallisia varastoja ovat perinteiset akut ja virtausakut. Sähköisiin varastoihin kuuluvat kondensaattorit, superkondensaattorit ja suprajohtavat magneettiset energiavarastot (engl. Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES). Mekaanisiin varastoihin kuuluvat pumppuvesivarastot (engl. Pumped Hydro Energy Storage, PHES), vauhtipyörät, paineistetun ilman energiavarastot (engl. Compressed Air Energy Storage, CAES), nesteytetyn ilman energiavarastot (engl. Liquid Air Energy Storage, LAES) sekä painovoimaiset energiavarastot. Kemiallisen energian varastoihin kuuluvat kaasumaiset, nestemäiset ja kiinteät polttoaineet, kuten vety, metanoli ja biomassa. (Grönman et al. 2022, 8–9; Sterner ja Bauer 2019, 35–36; World Energy Council 2016, 10.) Energiavarastojen luokittelu on esitetty kuvassa 13. Harmaalla taustalla olevia teknologioita käsitellään tarkemmin.

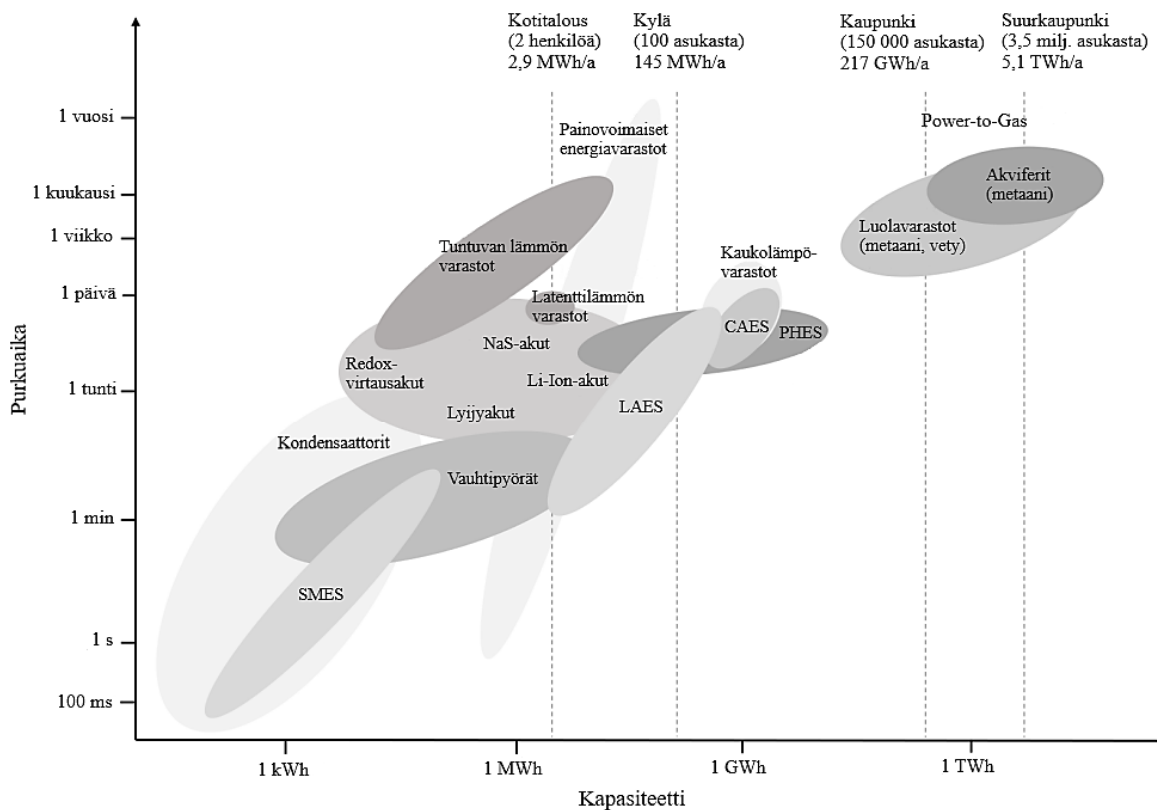


Kuva 13. Energiavarastojen luokittelu (Grönman et al. 2022, 8–9; Sterner ja Bauer 2019, 35–36; World Energy Council 2016, 10).

U.S. Department of Energy:n globaalien energiavarastotietokannan mukaan energiavarastojen asennettu kokonaisteho oli vuonna 2021 noin 191 GW. Pumppuvesivarastot edustivat selvästi suurinta osuutta, noin 95 %. Seuraavaksi suurimpia osuuksia edustivat akut ja tuntuvan lämmön varastot. (U.S. Department of Energy 2021.)

Energian varastointiteknologioiden tekniset ominaisuudet vaihtelevat teknologiakohtaisesti, jonka vuoksi eri teknologioita käytetään eri sovelluskohteissa. Jokaisella teknologialla on sille ominaiset vahvuudet ja heikkoudet, joiden avulla eri energiavarastojen soveltuvuutta tiettyyn sovelluskohteeseen voidaan arvioida. Eri varastointiteknologioita on myös mahdollista yhdistellä, jolloin sovelluskohteen vaatimukset voidaan täyttää paremmin. Lisäksi yhdellä energiavarastolla voi olla useampi sovelluskohde. Vertailtavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi kapasiteetti, purku-aika, lataus- ja purkuteho, hyötysuhde, kustannukset, vasteaika, tekninen käyttöikä, teho- ja energiatiheys sekä teknologian kypsyyssaste.

Kuvassa 14 on esitetty kapasiteetti ja purkuaika eri energiavarastoille. Kaavion kummatkin akselit ovat logaritmisia. Tiedot perustuvat pääasiassa Sternerin ja Theman (2019) esittämiin tietoihin Saksassa olevista energiavarastosta. Grönman et al. (2022) ovat lisänneet kaavioon LAES:in ja painovoimaiset energiavarastot. (Grönman et al. 2022, 10–11; Sterner ja Thema 2019, 640, 646.)



Kuva 14. Energiavarastojen kapasiteetti ja purkuaika (muokattu lähteestä Grönman et al. 2022, 11, alkuperäinen kuva Sterner ja Thema 2019, 646).

Energiavarastot, joilla on pieni kapasiteetti ja lyhyt purkuaika, kuten kondensaattorit, SMES ja vauhtipyörät, soveltuvat esimerkiksi sähköjärjestelmän taajuuden ja jännitteen hallintaan. Vastaavasti energiavarastot, joilla on suurempi kapasiteetti ja pidempi purkuaika, kuten akut, lämpövarastot ja PtG-varastot, soveltuvat tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen esimerkiksi tunti-, vuorokausi- ja kausitasolla. Pumppuvesivarastot, CAES, LAES ja painovoimaiset varastot ovat tyypillisesti suuria laitekokonaisuuksia, joten niiden ei oleteta soveltuvan hyvin CHP-laitoksen yhteyteen.

Energiavarastoilta toivottuja ominaisuuksia CHP-laitoksen yhteydessä ovat esimerkiksi riittävän suuri kapasiteetti, megawattitason lataus- ja purkuteho sekä kompakti koko. Lisäksi lämpövarastoilla lämpötilataso on tärkeä tekijä. Tässä työssä käsitellään tarkemmin lämmön varastointiteknologioita, perinteisiä akkuja ja virtausakkuja, koska niiden katsotaan soveltuvan CHP-laitoksen yhteyteen esimerkiksi purkuajan, tehon, kapasiteetin ja fyysisen koon puolesta. Lämpövarastojen purku-aika on tunneista kuukausiin ja kapasiteetti megawattitunneista jopa gigawattitunteihin lämpövaraston tyypistä riippuen. Perinteiset akut ja virtausakut tarjoavat usean tunnin purku-aikoja ja megawattituntien kapasiteettia. Käsiteltyjen energiavarastojen ominaisuuksista löytyy tarkempaa tietoa liitteistä 1 ja 2.

4.2 Lämpöenergian varastointi

Lämpöenergiavarastoja (engl. Thermal Energy Storage, TES) käytetään tasapainottamaan energian tuotannon ja kysynnän välisiä eroja. Lämpöenergian varastoinnilla on mahdollista kasvattaa energiajärjestelmän tehokkuutta, joustavuutta ja luotettavuutta sekä laskea kustannuksia ja päästöjä. (Cabeza et al. 2021, 1–2; Dincer ja Ezan 2018, 58, 85.) Lämpöenergiavarastot voidaan jakaa varastointiajan mukaan lyhyt- ja pitkäaikaisiin varastoihin sekä lämpötilan mukaan matalan ja korkean lämpötilan varastoihin (Dincer ja Ezan 2018, 52, 57). Toimintalämpötila-alue on tärkeä ominaisuus, sillä lataus- ja purkulämpötilat määrittävät pitkälti järjestelmälle soveltuvan käyttökohteen (Stadler et al. 2019b, 565).

Lämpöenergiavarastot sisältävät sekä lämmön että kylmän varastoinnin (Cabeza et al. 2021, 1). Varastoitavan lämpöenergian lämpötilan ollessa ympäristön lämpötilaa korkeampi, puhutaan lämpövarastosta ja vastaavasti lämpötilan ollessa ympäristön lämpötilaa matalampi, puhutaan kylmävarastosta. (Stadler et al. 2019b, 565.) Tässä työssä keskitytään ainoastaan lämpövarastoihin.

Lämpöenergian varastointiin voidaan käyttää kolmea menetelmää: tuntuvan lämmön varastoja, latenttilämmön varastoja ja termokemiallisia energiavarastoja (Cabeza et al. 2021, 3). Tuntuvan lämmön varastot hyödyntävät varastomateriaalin lämpötilan muutosta, latenttilämmön varastot materiaalin faasimuutosta ja termokemialliset energiavarastot palautuvia kemiallisia reaktioita sekä sorptioprosesseja (Dincer ja Ezan 2018, 51, 59). Taulukossa 3 on vertailtu eri lämmönvarastointimenetelmiä.

Taulukko 3. Lämpövarastojen tyypillisiä ominaisuuksia (Dincer ja Ezan 2018, 59; IEA 2022a; IRENA 2020, 69).

Lämpövaraston tyyppi	Tuntuva lämpö	Latenttilämpö	Termokemiallinen
Energiatiheys [kWh/m ³]	15–200	30–110	100–1200
[kWh/t]	10–110	40–110	100–400
Tehotiheys [kW/m ³]	20–500	10–80	-
[kW/t]	15–500	5–40	-
Lämpötila-alue [°C]	> 1000	< 1000	5–900
Hyötysuhde [%]	50–99	75–98	45–100
Itsepurkautuminen [%/vrk]	0,5–4	0,5–15	-
Tekninen käyttöikä [vuotta]	15–50	-	20–50
[sykliä]	> 10 000	300–10 000	-
Investointikustannus [€/kW]	1–150	50–400	-
[€/kWh]	0,1–70	10–100	8–100
Varastoinnin kesto	Tunteja-kuukausia	Tunteja-kuukausia	Tunteja-kuukausia
Vasteaika	Minuutteja	Minuutteja	Minuutteja
Kypsyysaste (1–9)	4–9	4–9	3–4

Tuntuvan lämmön varastot ovat kehitetyin, laajimmin käytetty ja edullisin lämmönvarastointiteknologia. Latenttilämmön ja termokemiallisilla varastoilla on tyypillisesti suurempi energiatiheys ja korkeampi hyötysuhde, mutta myös korkeammat investointikustannukset. Latenttilämmön varastoja on kaupallisesti saatavilla joidenkin materiaalien osalta (Cabeza et al. 2021, 8). Termokemialliset energiavarastot ovat potentiaalinen teknologia suuren energiatheyden ansiosta, mutta vaativat vielä kehitystä saavuttaakseen kaupallisen tason. (Dincer ja Ezan 2018, 58–59; Stadler et al. 2019b, 568, 574.)

4.2.1 Tuntuvan lämmön varastot

Tuntuvan lämmön varastoissa lämpöenergia varastoidaan kasvattamalla varastomateriaalin lämpötilaa. Varastoa purettaessa varastomateriaalin lämpötila puolestaan laskee. Varastoitu energia riippuu materiaalin tiheydestä, varaston tilavuudesta, materiaalin ominaislämpökapasiteetista ja lämpötilan muutoksesta. Varastoitu lämpöenergia voidaan esittää muodossa

$$Q = mc_p \Delta T \quad (4)$$

jossa Q on varastoitu lämpöenergia [J], m on varastomateriaalin massa [kg], c_p on ominaislämpökapasiteetti [J/kgK] ja ΔT on lämpötilan muutos [K]. Massa voidaan esittää myös tiheyden ρ [kg/m³] ja tilavuuden V [m³] tulona. (Dincer ja Ezan 2018, 59–60; Stadler et al. 2019b, 574.)

Tuntuvan lämmön varastointiin käytetään nesteitä ja kiinteitä materiaaleja tai näiden yhdistelmiä. Kaasut eivät ole käytännöllinen vaihtoehto, koska ne vaativat suuren tilavuuden. (Cabeza et al. 2021, 6.) Nestemäisiä varastomateriaaleja ovat esimerkiksi vesi, termiset öljyt, sulasuolat ja sulat metallit. Kiinteitä varastomateriaaleja ovat esimerkiksi keraamiset tiilet, metallit, betoni, kallio, kivet, hiekka ja maaperä. (Cabeza 2021, 38; Dincer ja Ezan 2018, 61, 69; Laing-Nepustil ja Zunft 2021, 84–85; Stadler et al. 2019b, 575.) Nestemäisten varastomateriaalien etuna on korkea lataus- ja purkuteho. Kiinteät materiaalit puolestaan soveltuvat hyvin korkeille varastointilämpötiloille. (Stadler et al. 2019b, 574.)

Vesi on yleisin varastomateriaali 0–100 °C lämpötila-alueella (Cabeza 2021, 37). Yli 100 °C lämpötiloissa veden käyttöä rajoittaa korkea höyrinpaine, jonka seurauksena säiliö on paineistettava veden höyrystymisen estämiseksi. Yli 100 °C lämpötiloissa voidaan käyttää veden sijaan termisiä öljyjä, sulasuoloja tai kiinteitä materiaaleja. Termiset öljyt soveltuvat ympäristön paineessa noin 0–400 °C ja sulasuolat noin 170–560 °C lämpötila-alueelle. (Stadler et al. 2019b, 575–576, 587–588.) Kiinteiden materiaalien lämpötilaa voidaan kasvattaa materiaalista riippuen jopa selvästi yli 1000 °C (Laing-Nepustil ja Zunft 2021, 84).

Tuntuvan lämmön varastoja ovat esimerkiksi kaukolämpöakut ja kaukolämmön kausivarastot, joissa varastomateriaalina toimii vesi. Kaukolämpöakku on suuri vedellä täytetty teräs-säiliö, jota käytetään kaukolämmön lyhytaikaiseen varastointiin. Suomessa rakennetut kaukolämmön kausivarastot ovat pääasiassa luolavarastoja. Lisäksi Suomeen on suunnitteilla allastyypinen kaukolämmön kausivarasto (Hyvinkään Lämpövoima 2022). Kaukolämmön kausivarastolla tasataan tuotannon ja kulutuksen pidempiaikaista vaihtelua.

Suomalainen Polar Night Energy on kehittänyt hiekkaan perustuvan lämpövaraston ja ensimmäinen toimitus tehtiin Kankaanpään kesällä 2022 (Polar Night Energy 2023). Rondo Energy tarjoaa puolestaan lämpövarastoa, jossa lämpö varastoidaan tiiliin (Rondo Energy 2023). Kummassakin varastointiratkaisussa ideana on tuottaa lämpöä edullisella sähköllä ja varastoida se myöhemmin käytettäväksi. Sulasuoloja käytetään lämmön varastointiin esimerkiksi keskitetyissä aurinkovoimaloissa (Stadler et al. 2019b, 587–588).

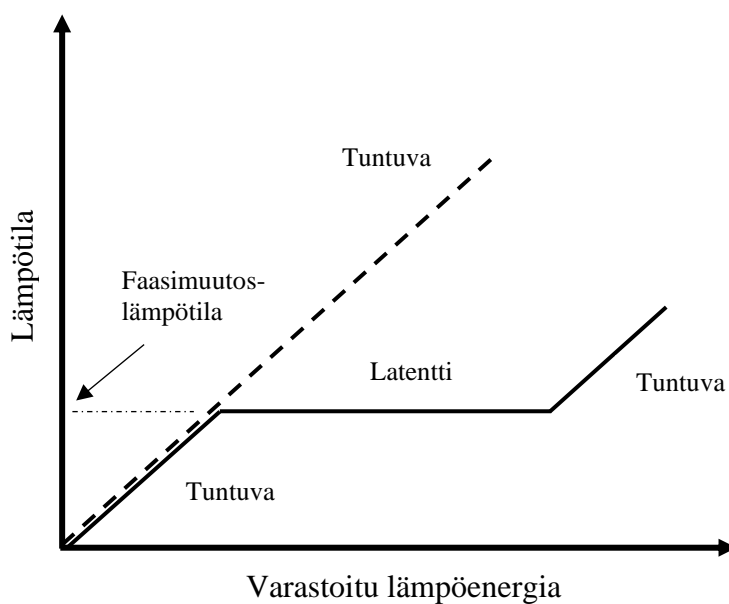
4.2.2 Latenttilämmön varastot

Latenttilämmön varastoissa hyödynnetään materiaalin faasimuutosentalpiaa sekä tuntuva lämpöä (Stadler et al. 2019b, 568). Faasimuutoksen aikana materiaali sitoo tai luovuttaa lämpöä vakio­lämpötilassa. Materiaali voi sitoa tai luovuttaa lämpöä myös ennen faasimuutosta ja faasimuutoksen jälkeen yhtälön 4 mukaisesti, jolloin materiaalin lämpötila muuttuu. Täten varastoitu kokonaisenergia on

$$Q = m \cdot (c_{p,1}\Delta T_1 + \Delta h + c_{p,2}\Delta T_2) \quad (5)$$

jossa $c_{p,1}$ on materiaalin ominais­lämpö­kapasiteetti ennen faasimuutosta [J/kgK], ΔT_1 on materiaalin lämpötilan muutos ennen faasimuutosta [K], Δh on faasimuutosentalpia [J/kg], $c_{p,2}$ on materiaalin ominais­lämpö­kapasiteetti faasimuutoksen jälkeen [J/kgK] ja ΔT_2 on materiaalin lämpötilan muutos faasimuutoksen jälkeen [K]. (Dincer ja Ezan 2018, 72–73; Stadler et al. 2019b, 588–589.)

Kuvassa 15 on havainnollistettu tuntevan lämmön ja latenttilämmön varastointia. Latenttilämmön varastot voivat varastoida pienellä lämpötilaerolla enemmän lämpöenergiaa tuntevan lämmön varastoihin verrattuna. Lisäksi faasimuutoksen aikana varaston lataus ja purku tapahtuvat vakio­lämpötilassa. (Bruno et al. 2021, 222; Stadler et al. 2019b, 568, 589, 590.)



Kuva 15. Tuntevan ja latenttilämmön varastointi (mukai­llen Bruno et al. 2021, 222).

Latenttilämmön varastoissa käytetään tavallisesti faasimuutosta kiinteästä nesteeseen, jolloin materiaalin sulaessa energiaa varastoituu ja materiaalin jähmettyessä energiaa vapautuu. Faasimuutoksella nesteestä kaasuun on suuri faasimuutosentalpia, mutta se vaatii suuren tilavuuden, eikä ole tästä syystä käytännöllinen. (Dincer ja Ezan 2018, 72; Stadler et al. 2019b, 568, 591–592.) Myös kiinteä-kiinteä faasimuutosta, jossa muutokset tapahtuvat materiaalin kiderakenteessa käytetään (Fallahi et al. 2017, 1428; Nazir et al. 2019, 494).

Latenttilämmön varastoissa käytettäviä materiaaleja kutsutaan faasimuutosmateriaaleiksi (engl. Phase Change Material, PCM). Kiinteä-neste faasimuutosmateriaalit voidaan jakaa orgaanisiin, epäorgaanisiin ja eutektisiin materiaaleihin. Orgaanisiin materiaaleihin kuuluvat parafiinit, rasvahapot, esterit, alkoholit ja glykolit. Epäorgaanisiin materiaaleihin kuuluvat suolat, suolahydraatit sekä metalliyhdisteet ja -seokset. Eutektisiin materiaaleihin kuuluvat erilaiset orgaanisten ja epäorgaanisten materiaalien seokset. Kiinteä-kiinteä faasimuutosmateriaaleihin kuuluvat erilaiset polymeerit. (Dincer ja Ezan 2018, 74–75; Fallahi et al. 2017, 1428; Nazir et al. 2019, 494–496.) Eri faasimuutosmateriaalien sulamislämpötilat vaihtelevat alle 0 °C ja yli 1000 °C välillä (Nazir et al. 2019, 496–498; Stadler et al. 2019b, 593).

Parafiinit ja suolahydraatit ovat yleisesti käytettyjä materiaaleja (Dincer ja Ezan 2018, 76; Stadler et al. 2019b, 593). Materiaalin valintaan vaikuttaa esimerkiksi faasimuutoslämpötila, faasimuutosentalpia, hinta ja saatavuus. Faasimuutoslämpötilan valintaan vaikuttaa lämpövaraston sovelluskohde. Vain osa faasimuutosmateriaaleista on kaupallistettu niihin liittyvien haasteiden vuoksi. Haasteita ovat esimerkiksi materiaalin alijäähtyminen, korrosio, faasien erottelu, pitkäaikainen stabiilisuus, matala lämmönjohtavuus, heikko lämmönsiirto ja vaikeasti hallittava tilavuuden muutos. (Cabeza et al. 2021, 8; Stadler et al. 2019b, 590.) Uusia materiaaleja tutkitaan kuitenkin aktiivisesti.

Lappeenrantalainen Elstor Oy tarjoaa faasimuutokseen perustuvaa lämpövarastoa. Elstor Oy:n mukaan lämpövaraston kapasiteetti on 5–15 MWh, latausteho 0,5–2,5 MW ja purkuteho maksimissaan 2 MW. Varaston hyötysuhteeksi ilmoitetaan 95 %. Varastolla voidaan tuottaa myös höyryä, jonka lämpötila on enintään 200 °C ja paine 16 baaria. Elstor Oy:n lämpövaraston latauksessa on tarkoitus hyödyntää uusiutuvaa edullista sähköä, kuten Polar Night Energyn ja Rondo Energyn lämpövarastoissakin. (Elstor Oy 2023.) Lappeenrannassa on kokeiltu Elstor Oy:n lämpövarastoa Mustolan kaukolämpöverkon yhteydessä (Lappeenrannan Energia Oy 2021).

4.2.3 Termokemialliset energiavarastot

Termokemiallisten energiavarastojen toiminta perustuu palautuviin endo- ja eksotermisiin reaktioihin. Varastoa ladatessa yhdiste hajoaa endotermisessä reaktiossa reaktiotuotteiksi, jotka varastoidaan erikseen. Varastoa purettaessa reaktiotuotteet yhdistyvät eksotermisessä reaktiossa takaisin alkuperäiseksi yhdisteeksi vapauttaen lämpöä. Palautuva reaktio voidaan esittää muodossa



jossa A on yhdiste, ΔH_r on yhdisteen reaktioentalpia [J/mol], B on reaktiotuote ja C on reaktiotuote. (Dincer ja Ezan 2018, 80; Frazzica et al. 2021, 425; Linder 2021, 477; Pardo et al. 2014, 592–593.)

Reaktiossa sitoutuva tai vapautuva lämpöenergia voidaan esittää muodossa

$$Q = n_A \Delta H_r \quad (7)$$

jossa n_A on yhdisteen ainemäärä [mol] (Dincer ja Ezan 2018, 80; Pardo et al. 2014, 593).

Termokemialliset energiavarastot voidaan jakaa kemiallisiin reaktioihin ja sorptioprosesseihin perustuviin järjestelmiin (Cabeza et al. 2021, 9; Dincer ja Ezan 2018, 59, 80). Kemiallisten reaktioiden ja sorptioprosessin toimintalämpötila on -50 °C ja yli 1000 °C välillä. Sorptioprosessit soveltuvat matalammille lämpötiloille, noin 400 °C asti, ja kemialliset reaktiot tästä ylöspäin. Sorptioprosessien reaktioentalpia on tyypillisesti 20 – 70 kJ/mol ja kemiallisten reaktioiden puolestaan 80 – 180 kJ/mol. (Cot-Gores et al. 2012, 5209, 5217.)

Termokemialliset energiavarastot ovat potentiaalinen teknologia, koska niiden energiatiheys on 10 kertaa suurempi kuin tuntuvan lämmön varastoilla ja 5 kertaa suurempi kuin latenttilämmön varastoilla. Lisäksi varastoitua energiaa on reaktioenergiaa, jonka ansiosta reaktiotuotteet voidaan varastoida ympäristön lämpötilassa. Tämän seurauksena termokemiallisilla energiavarastoilla ei ole lämpöhäviöitä varastoinnin aikana, joka mahdollistaa teoriassa hyvin pitkän varastointiajan. (Pardo et al. 2014, 592–594.)

Termokemialliset energiavarastot ovat vielä kehitysvaiheessa ja teknologian kaupallistaminen vaatii lisää tutkimus- ja kehitystyötä (Alva et al. 2018, 360; IEA 2022b). Teknologia on monimutkainen ja kehitystyötä vaaditaan esimerkiksi reaktioiden palautuvuuteen, korroosioon, lämmön- ja aineensiirtoon sekä kustannuksiin liittyen (Pardo et al. 2014, 593–594).

4.3 Sähköenergian varastointi

Sähköenergiaa voidaan varastoida usealla menetelmällä. Tässä työssä keskitytään perinteisiin akkuihin ja virtausakkuihin, jotka kuuluvat sähkökemiallisiin varastointimenetelmiin (kuva 13). Perinteiset akut ja virtausakut tarjoavat megawattituntien kapasiteettia ja useiden tuntien purkuaikaa (kuva 14). Taulukossa 4 on vertailtu akkuja ja virtausakkuja.

Taulukko 4. Perinteisten akkujen ja virtausakkujen ominaisuuksia (Zhang et al. 2021, 23).

Varastointiteknologia	Akku	Virtausakku
Teho [MW]	< 100	< 15
Kapasiteetti [MWh]	< 240	< 60
Energiatiheys [Wh/l]	15–500*	20–65
Hyötysuhde [%]	60–97	60–85
Tekninen käyttöikä [vuotta]	5–20*	5–20
Itsepurkautuminen [%/vrk]	0,05–0,6*	0–0,15
Vasteaika	Millisekunteja	Millisekunteja

* Sinkki-ilma akun energiatiheys 3000 Wh/l, tekninen käyttöikä 30 vuotta ja itsepurkautuminen 0,005 %/vrk. Metallililma akut ovat pääasiassa vasta kehitysvaiheessa.

CHP-laitoksen yhteydessä sähköä voisi varastoida sen ollessa edullista ja varastoa purkaa sähköön ollessa kalliimpaa. Täten voisi saavuttaa kustannustehokkuutta sähköntuotannossa. Sähkövarasto voisi toimia CHP-laitoksen yhteydessä ikään kuin yhtenä sähköntuotantokomponenttina, kuten sähkökattila ja kaukolämpöakku toimivat lämmöntuotantokomponentteina. Lisäksi sähkövarastoa voisi hyödyntää säätösähkömarkkinoilla.

4.3.1 Akut

Akkujen toiminta perustuu sähkökemiallisiin reaktioihin. Sähköenergia varastoituu akkuun kemialliseksi energiaksi, joka voidaan myöhemmin purkaa jälleen sähköenergiaksi. Akku koostuu elektrodeista, joita kutsutaan anodiksi ja katodiksi, sekä elektrolyytistä. Akkua purettaessa elektronien liike elektrodien välillä ulkoisessa piirissä saa aikaan sähkövirran. Akkua ladattaessa elektronien liike tapahtuu vastakkaiseen suuntaan kuin purettaessa. (Gallo et al. 2016, 806; Luo et al. 2015, 516.)

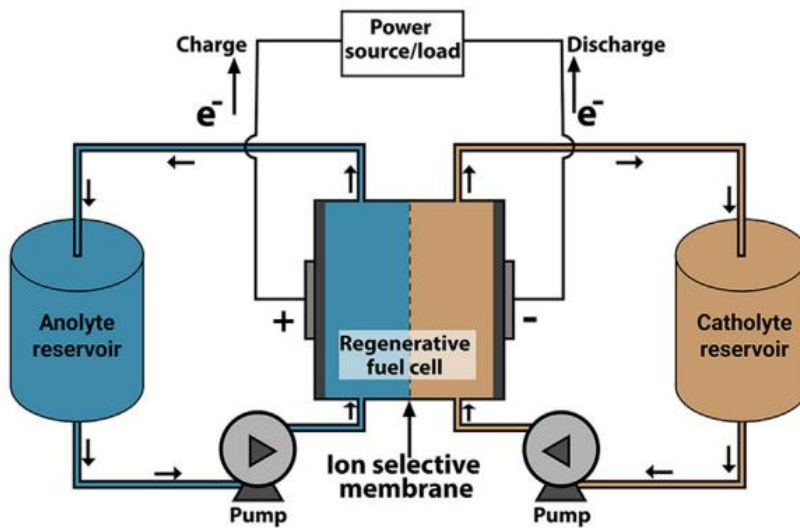
Akkutyyppejä on useita, kuten litiumioniakut, lyijyhappoakut, natriumakut ja nikkeliakut. Uusia materiaaleja, kuten erilaisia metalli-ilma-akkuja tutkitaan aktiivisesti. (Kebede et al. 2022, 4, 11–12; Koohi-Fayegh ja Rosen 2020, 2, 4) Litiumioniakut ovat tällä hetkellä yleisimmin käytetty akkutyyppeistä energian varastoinnissa (U.S. Department of Energy 2021). Eri akkutyypeillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Litiumioni- ja natriumakuilla on esimerkiksi tyypillisesti suurempi energiatiheys ja korkeampi hyötösuhde muihin akkutyyppeihin verrattuna (Kebede et al. 2022, 4–5; Zhang et al. 2021, 23).

Akut ovat kypsä teknologia (Grönman et al. 2022, 14). Tästä huolimatta akut kehittyvät ja uusia akkutyyppejä tutkitaan aktiivisesti. Akut tarjoavat kymmenien megawattien tehoja ja kymmenien megawattituntien kapasiteettia. Purkuaika on tyypillisesti maksimissaan joitakin tunteja. Akkujen vasteaika on parhaimmillaan millisekunneista sekunteihin, eli lähes samalla tasolla kuin superkondensaattoreiden. (Kebede et al. 2022, 9; Zhang et al. 2021, 23.)

Akkujen haasteena on ikääntyminen, joka laskee niiden kapasiteettia. Akun käyttöikään vaikuttaa myös sen käyttötapa ja -olosuhteet, kuten lämpötila. (Stadler et al. 2019a, 259, 300.) Haasteena ovat myös esimerkiksi myrkylliset materiaalit, korroosio, käyttöturvallisuus ja korkea hinta (Argyrou et al. 2018, 807–809; Zhang et al. 2021, 11–13, 22). Akkujen hintojen odotetaan kuitenkin laskevan ja käytön lisääntyvän kiinteissä sovelluskohteissa (Kebede et al. 2022, 4). Esimerkiksi litiumioniakkujen hinta on laskenut merkittävästi vuosien 2013–2022 välisenä aikana (BloombergNEF 2022b). Lisäksi akkuteollisuuden kestävyttä on kyseenalaistettu esimerkiksi sen aiheuttamien ympäristövaikutuksien vuoksi.

4.3.2 Virtausakut

Virtausakkujen toiminta perustuu hapetus- ja pelkistysreaktioihin, kuten perinteisten akkujenkin. Virtausakussa on kaksi nestemäistä elektrolyyttiä, jotka varastoidaan kahteen erilliseen tankkiin. Elektrolyyttejä kierrätetään kahdessa erillisessä piirissä sähkökemiallisten kennojen läpi, joissa elektrolyytit pidetään erillään ioniselektiivisen kalvon avulla. Latauksen aikana toinen elektrolyyteistä hapettuu anodilla ja toinen pelkistyy katodilla, jolloin sähköenergia varastoituu kemialliseksi energiaksi. Varastoa purettaessa prosessi on käänteinen, jolloin elektrolyyttien virratessa kennojen läpi kemiallinen energia muunnetaan sähköenergiaksi. (Argyrou et al. 2018, 810; Zhang et al. 2021, 14.) Kuvassa 16 on esitetty virtausakun toimintaperiaate.



Kuva 16. Virtausakun toimintaperiaate (Argyrou et al. 2018, 810).

Virtausakkutyyppejä ovat esimerkiksi vanadiini redox, sinkkibromi ja polysulfidibromi virtausakut. Virtausakut ovat potentiaalinen teknologia pitkän aikavälin ja suuren mittakaavan sovelluskohteisiin. (Argyrou et al. 2018, 810.) Virtausakkujen teho ja kapasiteetti ovat skaalattavissa joustavasti, sillä teho riippuu elektrodien koosta sekä kennojen määrästä ja kapasiteetti elektrolyyttien koostumuksesta sekä määrästä. (Luo et al. 2015, 518; Zhang et al. 2021, 14.)

Virtausakkujen etuja ovat esimerkiksi pieni itsepurkautuminen, pitkä käyttöikä ja nopea vasteaika. Lisäksi alhainen varaustaso ei aiheuta ongelmia. (Argyrou et al. 2018, 810.) Eri virtausakkutyyppeiden heikkouksia ovat esimerkiksi matala energiatiheys, materiaalien korroosio ja myrkyllisyys sekä matala hyötysuhde (Zhang et al. 2021, 15–16, 22). Edellä mainitut heikkoudet eivät päde kaikkiin virtausakkutyyppeihin. Virtausakut ovat vielä pääasiassa kehitys ja kokeiluvaiheessa, mutta lähellä kaupallistumista (IEA 2022b; Kebede et al. 2022, 10, 14).

5 Puupolttoaineen kuivaus

Puupolttoaineiden kysyntä on kasvanut samalla kun saatavuus on heikentynyt, joka on johtanut puupolttoaineiden niukkuuden ja hintojen kasvuun. Puupolttoaineen kuivaus kasvattaa sen tehollista lämpöarvoa ja energiamäärää. Kasvaneella energiamäärällä voidaan korvata osa polttoaineen hankinnasta, joka helpottaa niukkuutta sekä voi tuoda taloudellista hyötyä. Kuivatulla puupolttoaineella, kuten kuorella, voidaan korvata esimerkiksi kalliimpia parempilaatuisia polttoaineita, kuten turvetta ja metsähaketta.

Puupolttoaineiden terminen kuivaus ei ole toistaiseksi kovin yleistä Suomessa. Leijukerroskattilat soveltuvat kosteille polttoaineille, jonka seurauksena kuivaukselle ei olla nähty tarvetta. Lisäksi kuivauksesta on huonoja kokemuksia 1970- ja 1980-luvuilta, jolloin kuivurit aiheuttivat esimerkiksi tulipaloja. (Holmberg 2020, 164.) Puupolttoaineita voidaan kuivattaa myös ulkoilmassa esimerkiksi varastoinnin yhteydessä, mutta se on hitaampaa.

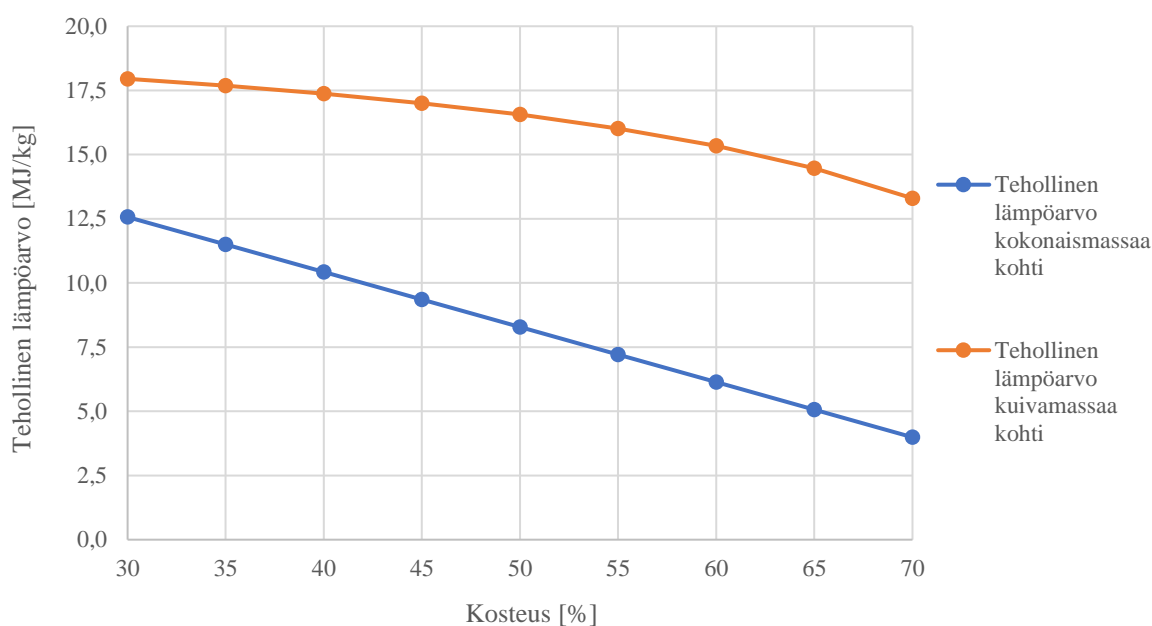
Puupolttoaineen kuivauksella voidaan saavuttaa seuraavia hyötyjä (Holmberg 2007, 8; Holmberg 2020, 164, 171; Roos 2008, 2):

- Polttoaineen tehollinen lämpöarvo ja energiamäärä kasvavat. Kattilan polttoainetehoa voidaan kasvattaa ilman, että polttoaineen massavirtaa kasvatetaan. Vaihtoehtoisesti sama polttoainetehon saavutetaan pienemmällä polttoaineen massavirralla.
- Korkeamman tehollisen lämpöarvon ansiosta adiabaattinen palamislämpötila kasvaa ja palaminen on täydellisempää. Täydellisemmän palamisen ansiosta palamatonta kiintoainesta ja päästöjä syntyy vähemmän.
- Polttoaineen laadun tasoittuminen, jolloin kattilan ajettavuus ja säädettävyys paranevat.
- Savukaasujen määrä vähenee, koska vähemmän kosteutta siirtyy savukaasuihin.
- Polttoaineen biologinen hajoaminen ja kuiva-ainetappiot vähenevät polttoainetta varastoitaessa.

Tässä työssä ollaan kiinnostuneita taloudellisista hyödyistä puupolttoaineen energiamäärän nousun myötä, mutta myös muut hyödyt voivat jossakin tilanteessa olla merkittäviä.

Kosteus voidaan ilmoittaa kokonaismassaa tai kuiva-ainetta kohti. Kosteudesta tai kosteuspitoisuudesta puhuttaessa tarkoitetaan tavallisesti kokonaismassaa kohti ilmoitettua kosteutta. Kun kosteus ilmoitetaan kuiva-ainetta kohti, puhutaan kosteussuhteesta. (Holmberg 2020, 13; Mujumdar 2015, 13.) Tässä työssä kosteudesta puhuttaessa tarkoitetaan kokonaismassaa kohti ilmoitettua kosteutta.

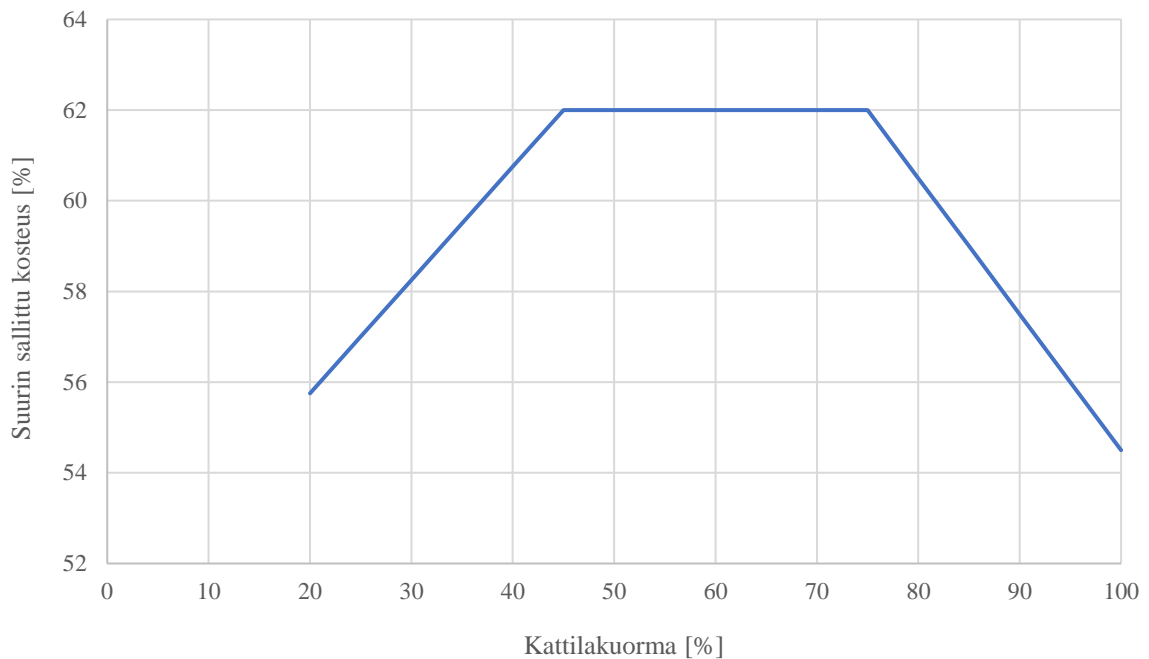
Havupuun kuoren tehollinen lämpöarvo kokonaismassaa ja kuivamassaa kohti kosteuden funktiona on esitetty kuvassa 17. Kuivaus kasvattaa polttoaineen tehollista lämpöarvoa, mutta polttoaineen energiamäärä ei kasva samassa suhteessa, koska kuivaus vähentää polttoaineen massaa. Energiamäärän muutos voidaan laskea kuivamassaa kohti esitetystä lämpöarvosta. (Holmberg 2020, 167.) Energiamäärän kasvu hidastuu polttoaineen kosteuden laskiessa.



Kuva 17. Havupuun kuoren tehollinen lämpöarvo kokonaismassaa ja kuivamassaa kohti. Kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on käytetty 19 MJ/kg. (mukaiillen Holmberg 2020, 167.)

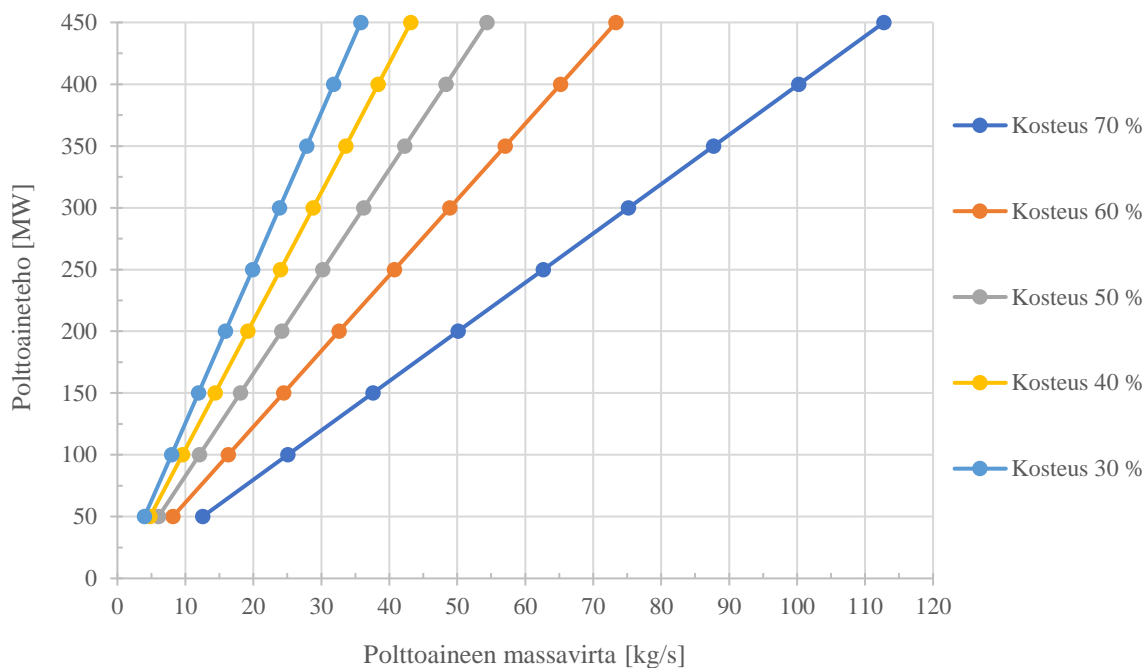
Leijukattiloissa voidaan polttaa hyvinkin kosteita polttoaineita. Polttoaineen kosteudella on kuitenkin merkitystä etenkin tilanteissa, joissa ollaan lähellä kattilan minimi- tai maksimikuormaa. Jos polttoaine on liian kosteaa, palamisprosessin ylläpito matalilla kuormilla on

hankalaa. Kosteuden kasvaessa liian suureksi, veden höyrystäminen vaatii niin paljon energiaa, ettei polttoaineesta vapautuva lämpö kykene ylläpitämään palamista. Vastaavasti maksimikuorman saavuttaminen liian kostealla polttoaineella ei onnistu. Kattilakuorman keskivaiheilla ja hieman yläpuolella voidaan käyttää kosteampaa polttoainetta. Kuvassa 18 on esitetty esimerkki polttoaineen suurimmasta sallitusta kosteudesta kattilakuorman funktiona.



Kuva 18. Suurin sallittu polttoaineen kosteus kattilakuorman funktiona.

Kuvassa 19 on esitetty kattilan polttoaineteho polttoaineen massavirran funktiona eri polttoaineen kosteuksilla. Kuvasta voidaan havaita yksi edellä mainituista polttoaineen kuivauksen hyödyistä. Kuivemmalla polttoaineella sama polttoaineteho saavutetaan pienemmällä polttoaineen massavirralla, kuin kosteammalla polttoaineella. Vaihtoehtoisesti kuivemmalla polttoaineella samalla polttoaineen massavirralla voidaan saavuttaa suurempi polttoaineteho, kuin kosteammalla. Polttoaineen kosteuden ollessa yli 50 %, sen alentaminen 10 prosenttiyksiköllä vaikuttaa merkittävästi, mutta kosteuspiitoisuuden laskiessa vaikutus vähenee.



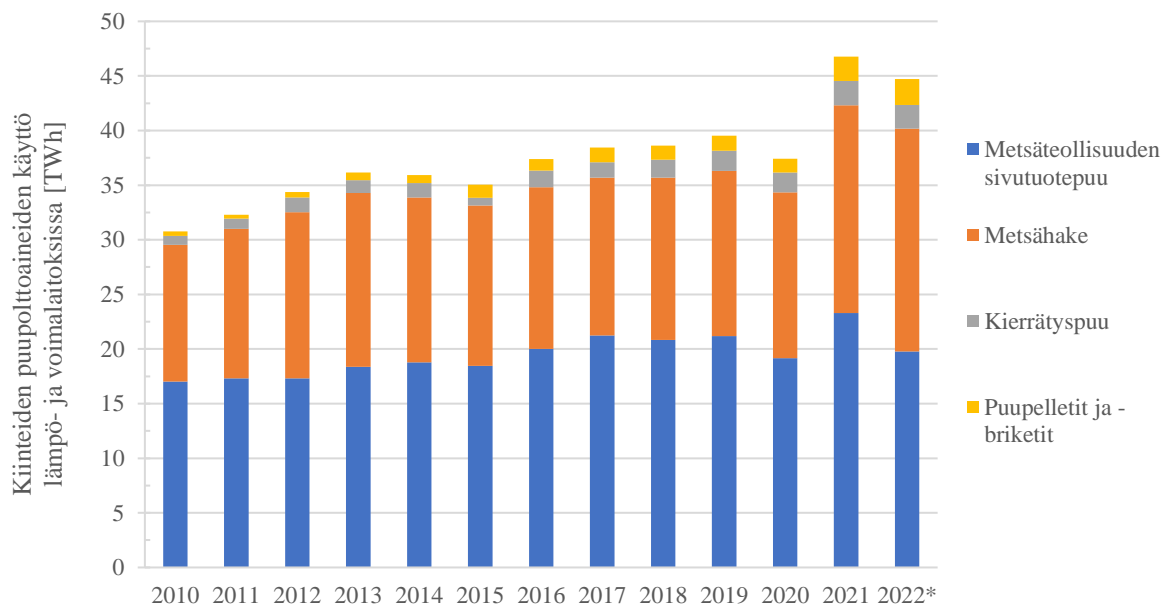
Kuva 19. Kattilan polttoaineteho ja polttoaineen massavirta polttoaineen eri kosteuksilla. Kuiva-aineen tehollisena lämpöarvona on käytetty 19 MJ/kg.

Kaukaan Voima, Kymin Voima ja Rauman Biovoima sijaitsevat UPM:n metsäteollisuusalueella. Metsäteollisuudessa syntyy erilaisia energiantuotannossa hyödynnettäviä sivuvirtoja, kuten kuorta, sahanpurua ja lietettä. Porin Prosessivoima sijaitsee Kaanaan teollisuusalueella, jossa ei ole metsäteollisuutta, joten samankaltaisia sivuvirtoja ei ole saatavilla. Metsäteollisuudessa syntyvien sivuvirtojen lisäksi voimalaitoksilla käytetään polttoaineena esimerkiksi hakkuutähteitä, kierrätyspolttoaineita ja turvetta.

Hakkuutähteiden kosteus on tyypillisesti niin alhainen, ettei niitä kannata kuivata polttoa varten. Kuivaus kuluttaa paljon lämpöenergiaa, jonka lisäksi liian kuiva polttoaine voi aiheuttaa haasteita alun perin kostealle polttoaineelle suunnitellulle kattilalle. Metsäteollisuuden sivuvirtojen kosteuspitoisuus sen sijaan on tyypillisesti korkea, jolloin kuivaus voi olla kannattavaa. Kuoren kosteus on tyypillisesti 45–65 % ja sahanpurun 45–60 % (Moilanen et al. 2002, 136; Alakangas et al. 2016, 205). Poltettavan lietteen kosteus on korkea, tyypillisesti 65–70 % (Lohiniva et al. 2001, 69). Polttoaineen kosteuspitoisuuteen vaikuttavat esimerkiksi polttoainetyyppi, varastointiaika, vuodenaika ja säätila (Holmberg 2020, 163). Lisäksi polttoaineen esikäsittely vaikuttaa kosteuspitoisuuteen.

5.1 Puupolttoaineiden niukkuus

Ilmastotavoitteet ja nousseet kustannukset ovat vähentäneet turpeen ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä energiantuotannossa. Irtaantuminen turpeesta ja fossiilisista polttoaineista energiantuotannossa on kasvattanut puupolttoaineiden kysyntää. (AFRY Management Consulting Oy 2023, 8, 13–15.) Kiinteiden puupolttoaineiden kokonaiskäyttö vuonna 2021 oli noin 46,8 TWh. Metsäteollisuuden sivutuotepuuta käytettiin noin 23,3 TWh, metsähaketta noin 19,0 TWh ja kierrätyspuuta sekä puupellettejä ja -brikettejä noin 2,2 TWh. Metsähakkeen käytöstä tuonnin osuuden on arvioitu olevan noin viidennes. Vuoden 2022 ennakkotiedon mukaan puupolttoaineiden kokonaiskäyttö lämpö- ja voimalaitoksissa laski, mutta metsähakkeen käyttö kasvoi. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa vuosina 2010–2022 on esitetty kuvassa 20. (Luonnonvarakeskus 2022.)



Kuva 20. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö lämpö- ja voimalaitoksissa vuosina 2010–2022. Vuosi 2022 on ennakkotieto. (Luonnonvarakeskus 2022).

Merkittäviä kysyntää kasvattavia laitoshankkeita lähiaikoina ovat olleet Helenin Vuosaaren biolämpölaitos ja Tampereen Sähkölaitoksen Naistenlahti 3 kattilalaitos. Vuosaaren biolämpölaitoksen polttoaineteho on 220 MW ja Naistenlahti 3:n noin 210 MW (Helen Oy 2022; Tampereen Sähkölaitos Oy 2023).

Samaan aikaan kun puupolttoaineiden kysyntä on kasvanut, niiden tarjonta on heikentynyt. Metsäteollisuuden sivutuotepuun tarjonta riippuu metsäteollisuuden suhdanteista. AFRY:n arvion mukaan metsäteollisuuden sivutuotepuun tarjonta heikkenee lyhyellä aikavälillä talouden taantumana vuoksi, mutta pitkällä aikavälillä tarjonta kuitenkin kasvaa. Lisäksi puupolttoaineiden vaihtoehtoiset käyttökohteet energiantuotannon sijaan rajoittavat puupolttoaineiden saatavuutta. (AFRY Management Consulting Oy 2023, 8, 33.) Toistaiseksi vaihtoehtoisia käyttökohteita on vähän, mutta tilanne voi muuttua, mikä voi kasvattaa puupolttoaineiden niukkuutta.

Energiapuun tuonti vuonna 2021 oli 6,8 TWh, josta idän tuonnin osuus oli yli 75 %. Osa idän tuonnista on mahdollista korvata tuonnilla muualta. Myös metsähakkeen tarjonta riippuu osittain metsäteollisuuden puunkäytöstä. Metsähakkeen kotimaista tarjontaa olisi mahdollista lisätä, mutta haasteena on kysynnän ja tarjonnan epätasainen maantieteellinen jakautuminen. AFRY:n mukaan energiapuun ja turpeen tarjonta eivät kykene kattamaan kysyntää lyhyellä aikavälillä. (AFRY Management Consulting Oy 2023, 32, 34–35, 40.)

AFRY Management Consulting Oy:n vuonna 2021 tekemässä selvityksessä tarkasteltiin energiapuun kysynnän kehitystä Suomessa, kysynnän ja kotimaisen tarjonnan alueellista tasapainoa, sekä kysynnän ja kotimaisen tarjonnan tasapainon vaikutusta ainespuun ja tuontipuun energiakäyttöön ja tätä kautta huoltovarmuuteen. Selvityksen mukaan turpeesta ja fossiilisista polttoaineista luopuminen kasvattaa puupolttoaineiden kysyntää koko Suomessa. Puupolttoaineiden kysyntä energiantuotannossa on korkeimmillaan vuonna 2030, jonka jälkeen kysyntä laskee. Kysynnän lasku johtuu esimerkiksi lämmöntuotannon sähköistymisestä ja hukkalämpöjen hyödyntämisen lisääntymisestä. Lisäksi kaukolämmön kulutuksen ennustetaan laskevan, joka johtuu esimerkiksi rakennusten energiatehokkuuden kehittymisestä. Perusskenaariossa kysyntä kasvaa 6,4 miljoonaa kuutiometriä ja maksimiskenaariossa 8,3 miljoonaa kuutiometriä referenssitason verrattuna vuoteen 2030 mennessä. (AFRY Management Consulting Oy 2021, 16–18, 40.)

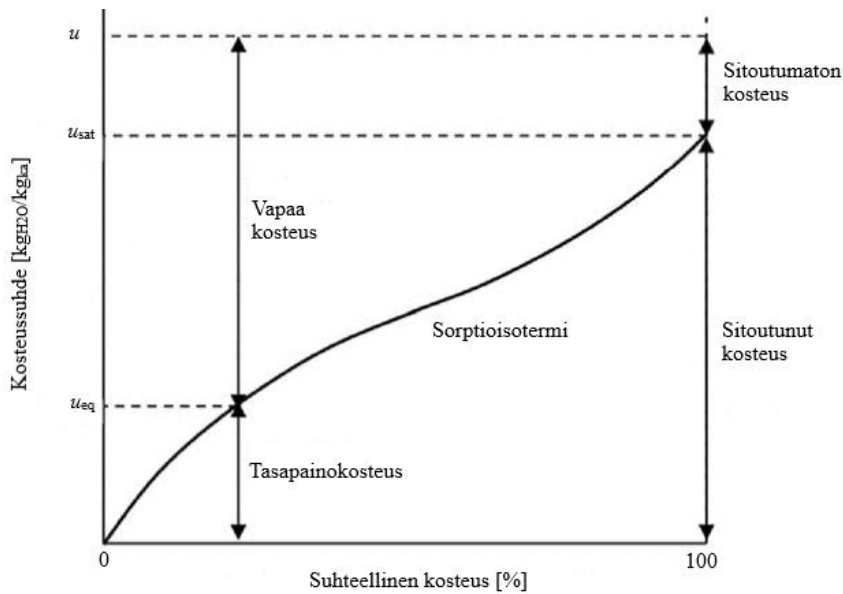
Kysynnän kasvu johtaa puupolttoaineiden alueelliseen niukkuuteen, jonka seurauksena kotimaan hankinnan kuljetusmatkat kasvavat ja polttoainekustannukset nousevat. Eniten niukkuutta esiintyy eteläisellä ja läntisellä alueella. Kotimaan tarjontaa täydennetään tuonnilla. Itäisellä alueella tuonnin rooli on merkittävä osuuden ollessa noin 20 % energiapuun kokonaishankinnasta vuonna 2030. Idässä tuonnin ajurina ei kuitenkaan ole niinkään niukkuus, vaan idän tuonnin kilpailukyky. (AFRY Management Consulting Oy 2021, 40.)

Luonnonvarakeskus teki vuonna 2021 selvityksen metsähakkeen riittävydestä energiaturpeen ja osittain kivihiilen korvaajana vuonna 2030. Metsähakkeen riittävyttä tarkasteltiin metsähaketaseen avulla, joka laskettiin potentiaalın ja kysynnän erotuksena. Potentiaalına käytettiin toteutunutta hakkuukertymää ja suurinta vuosina 2026–2035 ylläpidettävissä olevaa hakkuukertymää. Kysynnästä muodostettiin kolme skenaariota, joissa hyödynnettiin vuoden 2019 metsähakkeen, turpeen ja kivihiilen käyttöä. Ensimmäisessä skenaariossa 50 % turpeesta, toisessa 100 % turpeesta ja kolmannessa 50 % turpeesta sekä osa kivihiilestä korvattiin metsähakkeella. (Anttila et al. 2021, 1.)

Tulosten mukaan kokonaismetsähaketase on positiivinen jokaisessa skenaariossa, paitsi toteutuneen hakkuukertymän perusteella lasketussa skenaariossa, jossa 100 % energiaturpeesta korvataan metsähakkeella. Maakuntatasolla tase on kuitenkin paikoitellen negatiivinen, jonka perusteella alueellista niukkuutta tulee esiintymään. Kysyntä ylittää potentiaalın erityisesti rannikolla ja Etelä-Suomessa. Alueellista niukkuutta voidaan helpottaa hankkimalla metsähaketta tasepositiivisilta alueilta tai tuonnilla ulkomailta, mutta tällöin kuljetusmatkat ja -kustannukset kasvavat. Potentiaali ei kuitenkaan vastaa saatavuutta, joten niukkuus voi olla laskettua suurempaa. Saatavuus määräytyy metsänomistajien myyntihalukkuuden ja energiapuun ostajien maksuhalukkuuden mukaan. (Anttila et al. 2021, 1–3.)

5.2 Materiaalin kuivuminen

Kosteus esiintyy materiaalissa sitoutuneena tai sitoutumattomana kosteutena (kuva 21). Sitoutuneeksi kosteudeksi kutsutaan kosteutta, jonka höyrynpaine on pienempi kuin samassa lämpötilassa olevan veden. Vesi voi olla sitoutunut materiaalin kapillaareihin, solurakenteeseen tai pintaan fysikaalisen tai kemiallisen adsorption seurauksena. Sitoutumattomaksi kosteudeksi kutsutaan kosteutta, joka ylittää ilman kyllästyskosteutta vastaavan tasapainokosteuspitoisuuden. Sitoutumatonta kosteutta esiintyy esimerkiksi materiaalin pinnalla sekä huokosissa. Vapaaksi kosteudeksi kutsutaan kosteutta, joka voidaan poistaa materiaalista vallitsevissa olosuhteissa, kuten tietyssä lämpötilassa. Kun vapaa kosteus on poistunut, materiaali on saavuttanut tasapainokosteuden. Vapaa kosteus voi sisältää sekä sitoutunutta, että sitoutumatonta kosteutta. (de Haan ja Bosch 2013, 184–185; Mujumdar 2015, 4, 13.) Kirjallisuudessa käytetään toisinaan yksinkertaisemmin vain termejä sitoutunut ja vapaa kosteus, jolloin vapaalla kosteudella tarkoitetaan sitoutumatonta kosteutta.



Kuva 21. Kosteustyyppit materiaalissa (muokattu lähteestä de Haan ja Bosch 2013, 184).

Vesi esiintyy puussa nesteenä ja vesihöyrynä soluonteloissa sekä fysikaalisesti ja kemiallisesti sitoutuneena soluseinämässä. Lämpötilan ollessa alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vesi voi esiintyä myös jäänä. Puun syiden kyllästymispiste määrittää suurimman mahdollisen kosteuspitoisuuden, jonka puun soluseinämät kykenevät sitomaan. (Hukka 1996, 14.) Tätä suuremmilla kosteuspitoisuuksilla vettä esiintyy aina myös puun soluonteloissa. Puun kuivuessa soluonteloissa oleva vesi poistuu ensimmäisenä. (Raitila et al. 2018, 20.) Kun kaikki vesi on poistunut soluonteloista, vesi alkaa poistua soluseinämistä. Lietteet ovat tyypillisesti hyvin kosteita. Lietteessä on vettä, joka ei ole kiinnittynyt lietepartikkeleihin, lietepartikkeleiden välissä ja kapillaareissa olevaa vettä, lietepartikkelin pinnalle kiinnittynyttä vettä sekä solunsisäistä ja kemiallisesti sitoutunutta vettä (Chen et al. 2015, 869; Mowla et al. 2013, 366).

Kuivumisen ajavana voimana toimii höyrynpaine-ero. Materiaalin höyrynpaine pyrkii tasapainoon ympäristön höyrynpaineen kanssa, jolloin materiaali luovuttaa kosteutta ympäristöön. Kun materiaalin höyrynpaine on sama kuin ympäristön höyrynpaine, materiaali on saavuttanut tasapainokosteuden ja kuivuminen lakkaa. (Mujumdar 2015, 13; Raitila et al. 2018, 20.) Tasapainokosteus riippuu ympäristön olosuhteista, jolloin ympäristön olosuhteiden muuttuessa materiaali asettuu uuteen tasapainokosteuteen. Ympäristön höyrynpaine riippuu ympäristön lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta. Ympäristön lämpötila, suhteellinen kosteus ja materiaalin kosteussuhde määrittävät materiaalin lämpötilan ja höyrynpaineen. (Holmberg 2020, 19–20.)

Materiaalin kuivauksessa ollaan tavallisesti kiinnostuneita kuivumisnopeudesta ja kuivumisaikasta alkukosteudesta haluttuun loppukosteuteen. Kuivumisnopeuteen ja kuivumisaikaan vaikuttavat materiaalin ominaisuudet, kuivauskaasun ominaisuudet sekä pääasiallinen lämmönsiirtomekanismi. Materiaalin ominaisuuksia ovat esimerkiksi koko, muoto sekä alku- ja loppukosteus. Kuivauskaasun ominaisuuksia ovat esimerkiksi lämpötila, kosteus ja virtausnopeus. Lämmönsiirtomekanismeja ovat konvektio, johtuminen ja säteily. (Holmberg 2020, 56–57; Raitila et al. 2018, 21.)

Materiaalin kuivumisessa voidaan erottaa kolme vaihetta: materiaalin lämpenemisen vaihe, vakiokuivumisen vaihe ja hidastuvan kuivumisen vaihe. Aluksi materiaalin lämpötila nousee ympäristön olosuhteiden määrittämään märkälämpötilaan ja kuivumisnopeus kasvaa. Materiaalin lämpenemisen vaihe on tyypillisesti lyhyt verrattuna koko kuivumisaikaan. Materiaalin saavutettua märkälämpötilan, alkaa vakiokuivumisen vaihe, jossa materiaalin kuivumisnopeus on vakio. Vakiokuivumisen vaiheessa materiaalin pinnalle siirtyy enemmän kosteutta, kuin kuivauskaasu kykenee sitomaan. Vapaata kosteutta höyrystyy materiaalin pinnalta, mutta pinta pysyy kosteana. Materiaalin kosteuden laskiessa kuivumisnopeus alkaa hidastua, koska kosteuden siirtyminen materiaalin pinnalle heikkenee, jolloin materiaalin pinta alkaa kuivua ja pintalämpötila nousta. Kosteussuhdetta, jossa hidastuvan kuivumisen vaihe alkaa, kutsutaan kriittiseksi kosteussuhteeksi. Lopulta materiaali saavuttaa tasapainokosteuden ja kuivuminen lakkaa. (de Haan ja Bosch 2013, 188–190; Holmberg 2020, 57–60.)

5.3 Kuivausteknologiat

Kuivauksella viitataan tavallisesti kosteuden poistamiseen materiaalista termisin menetelmin (Mujumdar 2015, 4). Materiaalin kosteuspitoisuutta voidaan laskea myös mekaanisella vedenerotuksella. Mekaanista vedenerotusta käytetään erittäin kosteille jakeille, koska se on energiatehokkaampaa kuin terminen kuivaus. Mekaanista vedenerotusta käytetään esimerkiksi metsäteollisuudessa kuoren ja lietteen käsittelyn yhteydessä. Mekaanisella vedenerotuksella päästään maksimissaan noin 40–50 % kuiva-aine pitoisuuteen menetelmästä riippuen. Jos kuiva-ainepitoisuutta halutaan nostaa vielä tästä, on käytettävä termisiä kuivausmenetelmiä. Mekaanisia vedenerotumenetelmiä ovat erilaiset lingot ja puristimet, kuten suotonauhapuristin, ruuvipuristin ja kiekkopuristin. (Lohiniva et al. 2001, 52, 57.)

Tässä työssä keskitytään termisiin kuivausmenetelmiin. Oletuksena on, että mekaaninen vedenerotus on tehty ennen kuin puupolttoaine saapuu voimalaitokselle. Kuivausjärjestelmät voidaan jakaa esimerkiksi seuraavalla tavalla (Holmberg 2007, 9; Mujumdar 2015, 19):

- Kuivauskaasu
 - ilma, savukaasu, höyry
- Lämmönsiirtomekanismi
 - konvektio (suora), johtuminen (epäsuora) tai säteily
- Kuivauskammio
 - viirakuivuri, rumpukuivuri, kaskadikuivuri, pneumaattinen kuivuri jne.
- Toimintatapa
 - jatkuvatoiminen, eräperiaatteella toimiva

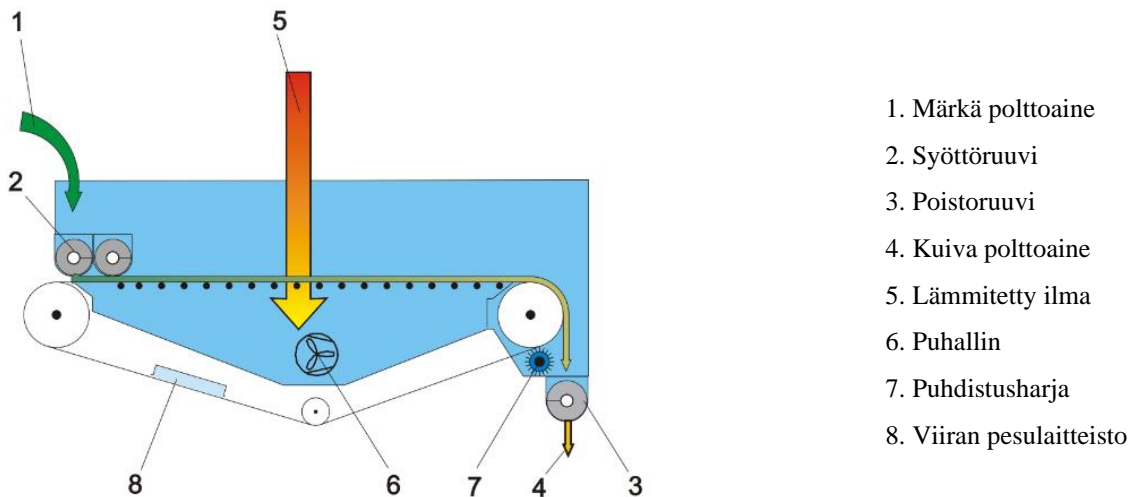
Tässä työssä kuivausteknologiat on jaoteltu kuivauskammion mukaan lukuun ottamatta kiintopetikuivureita, joiden yhteydessä käsitellään lyhyesti useampaa kuivuria. Puupolttoaineen kuivausteknologioita tarjoavat esimerkiksi Valmet, Andritz ja Stela. Käsiteltyjen kuivausmenetelmien teknisiä ominaisuuksia löytyy liitteestä 3.

5.3.1 Viirakuivuri

Viirakuivurissa polttoaine levitetään syöttölaitteen avulla tyypillisesti 10–20 cm paksuksi tasaiseksi patjaksi hitaasti liikkuvalla viiralla. Kuivausilma viedään polttoainepatjan läpi joko ylä- tai alapuolelta. Kuivausilma höyrystää kosteutta materiaalista ja kuljettaa sen pois. Kuivausilmaa voidaan lämmittää esimerkiksi hukkalämmöillä, matalapainehöyryllä tai savukaasuilla. Viirakuivuri sopii esimerkiksi kuorelle, sahanpurulle ja hakkuutähteille. (Fagerlös et al. 2010, 1269–1270; Myllymaa 2019, 23–24; Nummelin et al. 2014, 23.) Lietettä voidaan syöttää esimerkiksi kuoren sekaan, mutta yksinään liete tukkii viiran herkästi.

Viirakuivurin kokoonpano vaihtelee tapauskohtaisesti kuljettimien sijoittelun ja kuivausilman tuonnin mukaan. Kuivuri voi olla yksi- tai monikerroksinen ja yksi- tai monivaiheinen. Yksinkertaisin ratkaisu on yksikerroksinen ja yksivaiheinen kuivuri, jossa polttoaine kulkee kuivurin läpi yhden kerran yhtä kuljetinta pitkin. Yksikerroksisessa monivaiheisessa kuivurissa kuljettimet ovat sarjassa ja monikerroksisessa kuivurissa päällekkäin.

Monimutkaisemmat kokoonpanot parantavat kuivausprosessin hallintaa, mutta ovat kalliimpia. (Fagernäs et al. 2010, 1270; Poirier 2015, 394–395.) Kuvassa 22 on esitetty yksinkertainen viirakuivuri.

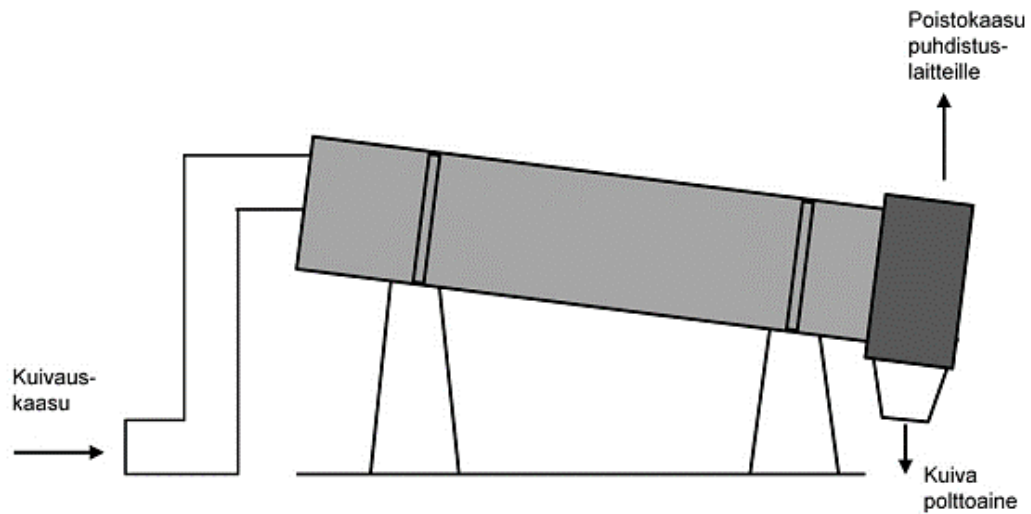


Kuva 22. Yksinkertainen viirakuivuri (Swiss Combi 2023 mukaan).

Viirakuivuri on rakenteeltaan yksinkertainen ja kestävä. Viirakuivurin säädettävyys on hyvä, jonka ansiosta kuivuminen on tasaista ja polttoaineen loppukosteutta on helppo hallita. Viirakuivurissa käytetään matalaa kuivauslämpötilaa, tyypillisesti korkeintaan 90–120 °C. Matalan kuivauslämpötilan ansiosta kuivauksessa voidaan hyödyntää hukkalämpöä, päästöt ovat maltilliset ja tulipaloriski pienempi verrattuna korkeampaa kuivauslämpötilaa käyttäviin kuivureihin. Matala kuivauslämpötila tekee kuitenkin viirakuivurista isokokoisen, joka kasvattaa investointikustannuksia. (Fagernäs et al. 2010, 1270; Myllymaa 2019, 24.)

5.3.2 Rumpukuivuri

Rumpukuivuri on hitaasti pyörivä sylinteri, joka on asetettu pieneen kulmaan vaakatasoon nähden. Polttoaine syötetään rumpuun korkeammalla olevasta päästä ja kuivattu materiaali poistuu rummusta matalammalla olevasta päästä (kuva 23). Rummun seinämällä olevat evät nostavat polttoainetta ylös, kunnes se tippuu takaisin rummun pohjalle. Rumpukuivuri voi olla tyypiltään suora, epäsuora tai näiden yhdistelmä. (Fagernäs et al. 2010, 1271; Krokida et al. 2015, 139.)



Kuva 23. Rumpukuivuri (Nummelin et al. 2014, 21).

Suorassa rumpukuivurissa vallitseva lämmönsiirtomekanismi on konvektio, jolloin kuivauskaasu ja materiaali ovat suorassa kontaktissa. Rummun läpi johdettava kuivauskaasu on tyypillisesti ilmaa tai savukaasua ja sen lämpötila on 200–600 °C. Kuivauskaasu voi virrata vastavirtaan tai myötävirtaan materiaaliin nähden, mutta myötävirtausta suositetaan biomassalle. (Fagernäs et al. 2010, 1271; Holmberg 2007, 10; Krokida et al. 2015, 139.)

Kuivauskaasun ja materiaalin suora kontakti ei sovellu kaikille materiaaleille, jolloin voidaan käyttää epäsuoraa rumpukuivuria. Epäsuorassa kuivurissa vallitseva lämmönsiirtomekanismi on johtuminen, jolloin kuivauskaasu ja materiaali eivät ole suorassa kontaktissa (Devahastin ja Mujumdar 2015, 127). Yleisin epäsuora rumpukuivuri on niin kutsuttu höyryputkikuivuri, jossa rummun seinämien läheisyyteen sijoitetut höyryllä lämmitetyt putket ovat kontaktissa materiaaliin ja kuivaavat sitä. Käytetty höyry on tyypillisesti kylläistä ja 4–10 baarin paineessa. Höyrystynyt kosteus johdetaan ulos rummista ilmavirran avulla. Epäsuoran rumpukuivuri on usein kalliimpi kuin suora rumpukuivuri. (Devahastin ja Mujumdar 2015, 130; Fagernäs et al. 2010, 1271.)

5.3.3 Kaskadikuivuri

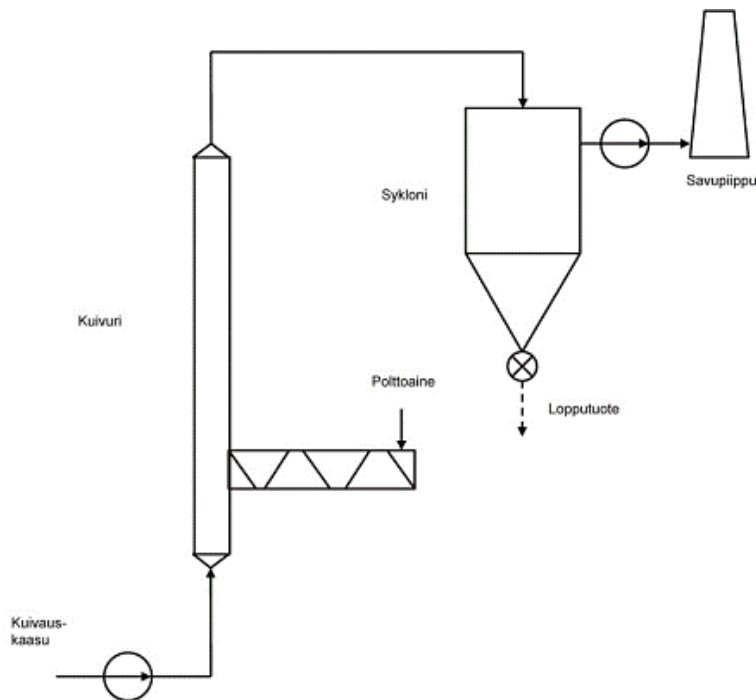
Kaskadikuivuria voidaan pitää eräänlaisena leijukerroskuivurin ja pneumaattisen kuivurin sovelluksena. Biomassojen partikkelikoko ja tiheys vaihtelevat voimakkaasti, jonka seurauksena tavallinen leijukerroskuivuri ei sovellu hyvin niille. (Holmberg 2007, 10; Holmberg 2020, 141.) Esimerkiksi Ruotsissa kaskadikuivuria on käytetty laajasti biomassan kuivaukseen (Roos 2008, 9).

Kaskadikuivurissa kuuma kuivauskaasu syötetään kuivauskammioon alaosasta ja kostea materiaali yläosasta. Materiaali tempautuu virtauksen mukaan, törmää heijastinlevyihin, putoaa alas ja nousee uudelleen ylös. Kuivunut materiaali poistuu kuivauskammion sivuilta poistaukoista ja kuivauskaasu kammion yläosasta. Kuivauskaasuna käytetään ilmaa tai savukaasuja ja tyypillinen lämpötila on 160–280 °C. (Amos 1998, 9; Holmberg 2007, 10; Roos 2008, 9.)

Kaskadikuivuri on kompaktin kokoinen viira- ja rumpukuivuriin verrattuna. Lisäksi se on kestävä ja soveltuu materiaaleille, joiden partikkelikoko vaihtelee. Heikkoutena on kuitenkin tulipaloriski kuivurin jälkeen ja alasajoissa sekä alttius korroosiolle ja eroosiolle, joka kasvattaa huoltokustannuksia. Lisäksi kuoren on raportoitu aiheuttavan ongelmia liikkuvissa osissa. (Holmberg 2007, 10; Roos 2008, 9.)

5.3.4 Pneumaattinen kuivuri

Pneumaattisessa kuivurissa, joka tunnetaan myös nimellä flash-kuivuri, kostea materiaali syötetään kuumalla nopeudella virtaavan kaasuvirran sekaan, joka kuljettaa materiaalin kuivurin läpi. Materiaali kulkeutuu kaasuvirtauksen mukana ylös kuivauskanavaa pitkin, jonka jälkeen kuivunut materiaali erotetaan kaasuvirrasta syklonissa (kuva 24). Kuivauskaasuna voidaan käyttää ilmaa, savukaasua tai höyryä. Savukaasuja käytettäessä kuivauslämpötila vaihtelee 150–700 °C välillä ja höyryä käytettäessä paineesta ja tulistuksesta riippuen tavallisesti 150 °C yläpuolella (Holmberg 2007, 10). Materiaalin viipymäaika kuivurissa on tyypillisesti lyhyt, jonka seurauksena pneumaattiset kuivurit soveltuvat lähinnä materiaalin pintakosteuden poistamiseen. Toisaalta viipymäaika voidaan pidentää materiaalin kierrätyksellä. (Amos 1998, 7; Levy ja Borde 2015, 381–382; Roos 2008, 9–10.)



Kuva 24. Pneumaattinen kuivuri (Nummelin et al. 2014, 22).

Pneumaattinen kuivuri on pienikokoinen, rakenteeltaan yksinkertainen ja kestävä, jonka lisäksi sen säädettävyys on hyvä (Levy ja Borde 2015, 382). Kuivurin ominaislämmön kulutus on pieni höyryä käytettäessä, jos lämpö otetaan talteen. Pneumaattiset kuivurit soveltuvat huomattavasti suuremmille partikkeleille kuin toiset kuivurityypit. Kuten kaskadikuivurissa, myös pneumaattisessa kuivurissa eroosio ja korroosio aiheuttavat haasteita ja kasvattavat huoltokustannuksia. Lisäksi kuivurin jälkeen ja alasajoissa on tulipaloriski. (Holmberg 2007, 10.) Sähkönkulutus on korkea nopean virtauksen vuoksi, jonka lisäksi biomassaa on yleensä silputtava pienemmäksi ennen kuivuriin syöttämistä (Amos 1998, 7; Roos 2008, 9–10).

5.3.5 Kiintopetikuivurit

Kiintopetikuivureilla (engl. fixed bed dryers) tarkoitetaan tässä yhteydessä kuivureita, joissa kuivauskaasu puhalletaan polttoainepedin läpi. Kuivauskaasun nopeus pidetään minimileijutusnopeuden alapuolella, jolloin peti pysyy kiinteänä. Kiintopetikuivurit toimivat usein eräperiaatteella ja samalla myös polttoainetarastona, mutta myös jatkuvatoimisia kiintopetikuivureita on. Kiintopetikuivureissa käytetään yleensä matalaa kuivauslämpötilaa. (Nummelin et al. 2014, 24, 30–31.)

Siilokuivurissa kuivausilmaa puhalletaan varastointisiiloon pohjasta tai sivusta ja kuljettuun polttoainepedin läpi se poistuu siilon yläosasta. Siilokuivureita käytetään laajasti esimerkiksi maataloudessa viljan kuivauksessa. Polttoainetta voidaan kuivata myös hitaasti liikkuvalla arinalla, jonka toimintaperiaate on samankaltainen kuin viirakuivurilla. (Nummelin et al. 2014, 25–27.) Kokkolassa on kokeiltu ulkoilmassa toimivaa aumakuivuria, jossa polttoaine on kasattu merikonttien päälle. Merikontit toimivat ilmanjakojärjestelmänä, joiden avulla matalalämpöinen kuivausilma syötetään polttoaineumaan. (Haikonen 2005, 26; Nummelin et al. 2014, 28.)

Kiintopetikuivurit ovat tavallisesti rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisia ja niiden investointikustannukset ovat usein matalammat kuin muilla kuivurityypeillä. Matalan kuivauslämpötilan ansiosta kiintopetikuivureissa voidaan hyödyntää hukkalämpöjä, mutta kuivauskapasiteetti on yleensä pieni ja polttoaineen kuivumisaika on pitkä. Lisäksi haasteena on usein ilmapirran kanavoituminen polttoainepedissä, joka johtaa epätasaiseen kuivumiseen. Kiintopetikuivureille on vain vähän laitetoimittajia, jonka seurauksena ratkaisut ovat usein tapauskohtaisesti räätälöityjä. (Nummelin et al. 2014, 24–25, 30–31.)

5.4 Haasteet

Puupolttoaineen kuivauksella voidaan saavuttaa aiemmin mainittuja hyötyjä, mutta täysin ongelmaton kuivaus ei ole. Terminen kuivaus kuluttaa paljon lämpöenergiaa, jonka seurauksena kuivauslämmön tulisi olla hyvin edullista tai ilmaista, kuten hukkalämpöä. Hukkalämpöjen lämpötilataso on kuitenkin tyypillisesti matala, eivätkä ne sovellu kaikille kuivurityypeille. Edellä käsitellyistä kuivurityypeistä matalille kuivauslämpötiloille soveltuvat viirakuivuri ja kiintopetikuivurit.

Kuivauksessa vapautuu kiinteitä hiukkaspäästöjä, orgaanisia yhdisteitä ja hajupäästöjä. Päästöt riippuvat kuivauskaasusta, kuivauslämpötilasta ja kuivattavasta materiaalista. Kuivauslämpötilan ollessa alle 100 °C päästöt ovat vähäisiä, mutta päästöt kasvavat nopeasti lämpötilan kasvaessa. Päästöjen suhteen noudatetaan ympäristölainsäädäntöä ja kuivurin poistokaasut on tarvittaessa puhdistettava. Lisäksi kuivurin mahdolliset laauhteet on tarvittaessa puhdistettava. (Fagernäs et al. 2010, 1268; Holmberg 2007, 11; Nummelin et al. 2014, 32.)

Polttoaineen kuivauksessa on otettava huomioon tulipalo- ja räjähdysriski. Kuivauksen yhteydessä vapautuvat palavat kaasut ja muodostuvat pölypilvet voivat aiheuttaa tulipalon tai räjähdysriskin. Merkittävänä riskitekijänä pidetään kuivauskaasun happipitoisuutta, jonka tulisi olla alle 10 tilavuusprosenttia. Lisäksi kiintopetikuivureissa polttoaineen biologiset reaktiot voivat johtaa itsestään syttymiseen, kuten polttoaineen varastoinnissa. (Fagernäs et al. 2010, 1269; Nummelin et al. 2014, 33.)

Suunniteltaessa kuivuria olemassa olevan kattilan yhteyteen, on syytä muistaa, että kattila on aikoinaan suunniteltu tietylle polttoaineen kosteuspuiteolosuhteille. Polttoaineen tehollisen lämpöarvon kasvaessa adiabaattinen palamislämpötila kasvaa, joka voi vaikuttaa lämmönsiirtoon ja ilmakertoimeen. Liian korkea palamislämpötila voi aiheuttaa haasteita petilämpötilan ja tuhkan sulamiskäyttäytymisen kanssa, jolloin kattilan petimateriaalin sintraantuminen ja agglomeroituminen on mahdollista. Lisäksi korkea palamislämpötila voi lisätä NO_x-päästöjä. (Holmberg 2007, 46; Holmberg 2020, 171.)

6 CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittäminen

Tässä luvussa tarkastellaan CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämistä sähkökattilan, kaukolämpöakun ja kuoren kuivauksen avulla. Sähkökattila tarjoaa vaihtoehtoisen ja kustannustehokkaan tavan lämmöntuotantoon, kun sähkön hinta on alhainen. Kaukolämpöakun avulla sähköntuotantoa voidaan ajoittaa paremmin, eli tuottaa sähköä enemmän, kun sähkön hinta on korkea ja vähemmän, kun sähkön hinta on matala. Kuoren kuivaus kasvattaa sen tehollista lämpöarvoa ja energiamäärää, jolloin voidaan saavuttaa säästöä polttoainekustannuksissa.

Tarkoituksena on kartoittaa edellä mainittujen teknologioiden potentiaalia laskentaesimerkien avulla. Laskennat ovat alustavia ja tästä syystä esimerkiksi osa alkuarvoista on arvioitu karkeasti. Tapaukset esitellään lyhyesti ja keskeisimmät tulokset käydään läpi. Yksityiskohtaisemmat tulokset löytyvät liitteistä 4–6.

6.1 Sähkökattila

Sähkökattilan toimintaa CHP-laitoksen yhteydessä mallinnettiin vuosien 2018–2022 sähkön tuntihintadatalla sekä kyseisien vuosien avulla lasketulla keskimääräisellä tuntihintaprofiililla. Lisäksi tutkittiin, kuinka CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien muutos vaikuttaa tuloksiin. Sähkökattilan lämpötehoksi on valittu 50 MW ja CHP-laitoksen muuttuviksi kustannuksiksi 30 €/MWh. Lämmöntuotannon data on yhdeltä vuodelta ja sitä käytetään eri vuosien välisessä tarkastelussa. Oletuksena on, ettei lämpökuorma muutu merkittävästi vuosien välillä.

Sähkökattilaa ajetaan, kun sen muuttuvat kustannukset ovat pienemmät kuin CHP-laitoksen. Sähkökattilan tehoa rajoittaa CHP-laitoksen kattilan minimikuorma. CHP-laitoksella on oltava riittävä lämpökuorma, jotta kattilan minimikuorma ei alitu. Minimikuorman alittuessa joudutaan käyttämään apujäähdytystä tai -lauhdutusta, jolloin lämpöä siirretään tyypillisesti vesistöön. Sähkökattilan käytöllä ei haluta lisätä apujäähdytyksen tai -lauhdutuksen käyttöä.

CHP laitoksen ollessa käynnissä on tarkasteltu kolmea ajotapaa:

- Normaali vastapaineajo, jolloin CHP-laitosta ajetaan normaalisti lämmöntarpeen mukaan ja sähköä tuotetaan rakennusasteen mukaisessa suhteessa. Kaikki lämpö tuotetaan CHP-laitoksella.
- Turbiinin sähkötehoa lasketaan, kun sähkön hinta laskee 10 €/MWh CHP-laitoksen sähköntuotannon muuttuvien kustannuksien alapuolelle. Kaikki lämpö tuotetaan CHP-laitoksella vastapainetuotantona ja turbiinin ohitusreduktioiden avulla.
- Kuten toinen tapaus, mutta sähkökattila on lisätty lämmöntuotantokomponentiksi. Sähkökattilaa käytetään, kun sen lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset ovat pienemmät kuin CHP-laitoksen.

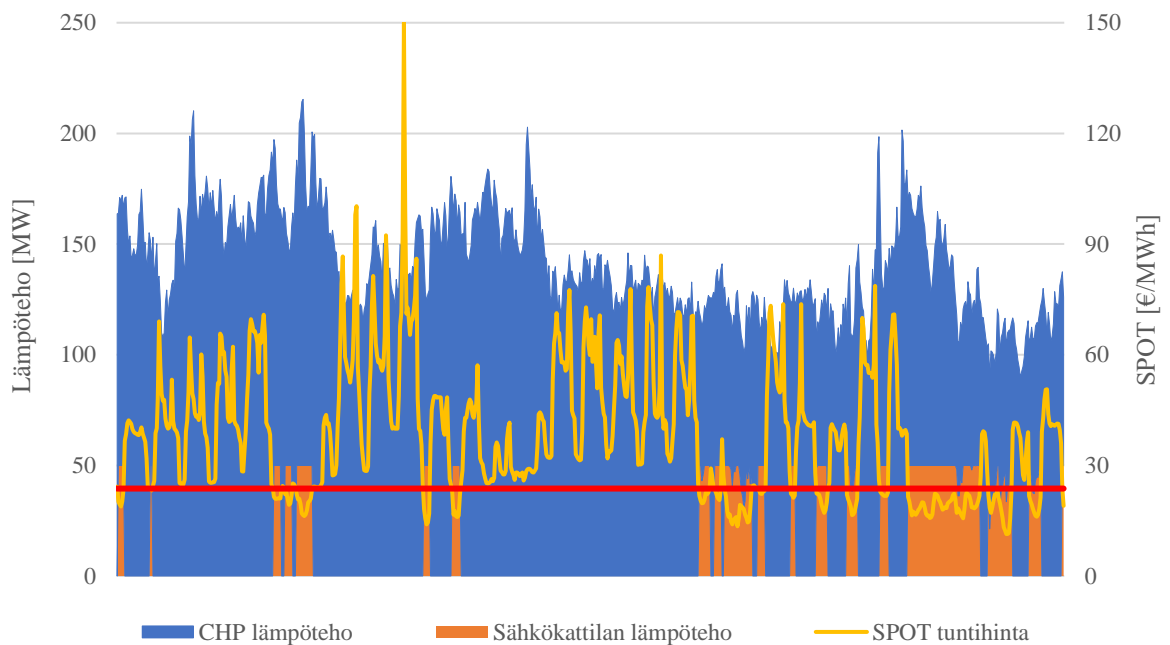
Normaalista vastapaineajosta katsotaan olevan siis kaksi askelta CHP-laitoksen ja sähkökattilan yhteisajoon. Turbiinin sähkötehon laskemisessa ajatuksena on, että olemassa olevan laitteiston säätöalue ja potentiaali hyödynnetään kokonaisuudessaan. Reduktioita käytetään tavallisesti vain turbiinin häiriötilanteissa ja pienillä kuormilla. Aktiivinen reduktioiden käyttö lisää kunnossapidon tarvetta. Ensimmäinen ja toinen ajotapa toimivat verrokkina kolmannelle ajotavalle.

Säästöt syntyvät, kun turbiinin sähkötehoa lasketaan sähkön ollessa edullista. Kun sähkön hinta on matalampi kuin tuotantokustannukset, sähkön tuotanto on tappiollista. Lisäksi sähkökattila vie lämpökuormaa CHP-laitokselta, joka myös laskee sähkötehoa. Koska sähkökattilan käyttö ajoittuu sähkön edullisille tunneille, tämä vähentää sähköntuotannon tappioita. Säästöä syntyy myös siitä, kun sähkökattilalla korvataan CHP-laitoksen lämmöntuotantoa sähkön ollessa edullista.

Kesällä CHP-laitoksen ollessa poissa käytössä sähkökattilalla voidaan korvata kaukolämmön muuta tuotantoa. Kaukolämmölle on arvioitu vakiokuorma kesäksi ja kaukolämmön muun tuotannon muuttuvaksi kustannukseksi on valittu 50 €/MWh. Sähkökattilaa käytetään, kun sen muuttuvat kustannukset ovat pienemmät kuin muun kaukolämmön tuotannon. Säästöä syntyy siitä, kun sähkökattilalla korvataan muuta kaukolämmön tuotantoa.

Tulokset

Sähkökattilan toimintaa maaliskuussa vuoden 2021 sähkön hintaprofiililla mallinnettuna on havainnollistettu kuvassa 25. Punainen viiva kuvaa sähkön hintaa, jota matalammalla arvolla sähkökattilaa käytetään. Sähkön hinta on riittävän edullinen sähkökattilan käytölle etenkin loppukuusta. Teho on toisinaan pienempi kuin 50 MW, koska CHP-laitoksen kattilan minimikuorma rajoittaa tehoa. Sähkön hinta on kuun puolivälissäkin useaan otteeseen noin 30 €/MWh, mutta se ei ole riittävän alhainen sähkökattilan käytölle.



Kuva 25. Sähkökattilan käyttö maaliskuussa vuoden 2021 sähkön hintaprofiililla.

Taulukossa 5 on esitetty CHP-laitoksen tuottama lämpö- ja sähköenergia, polttoaineen kulutus ja sähkökattilan tuottama lämpöenergia normaalilla vastapaineajolla sekä vuosien 2018–2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna. Tuloksissa on mukana sekä turbiinin sähkötehon laskemisen vaikutus, että sähkökattilan vaikutus. Vuosien 2018, 2019 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna sähkökattilan käyttö on vähäistä. Vuosien 2021 ja 2022 hintaprofiileilla käyttöä on jonkin verran enemmän ja vuoden 2020 hintaprofiililla selvästi enemmän. Taulukoissa sekä kuvissa lyhenne KM ja keskimääräinen viittaavat keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla tehtyyn mallinnukseen.

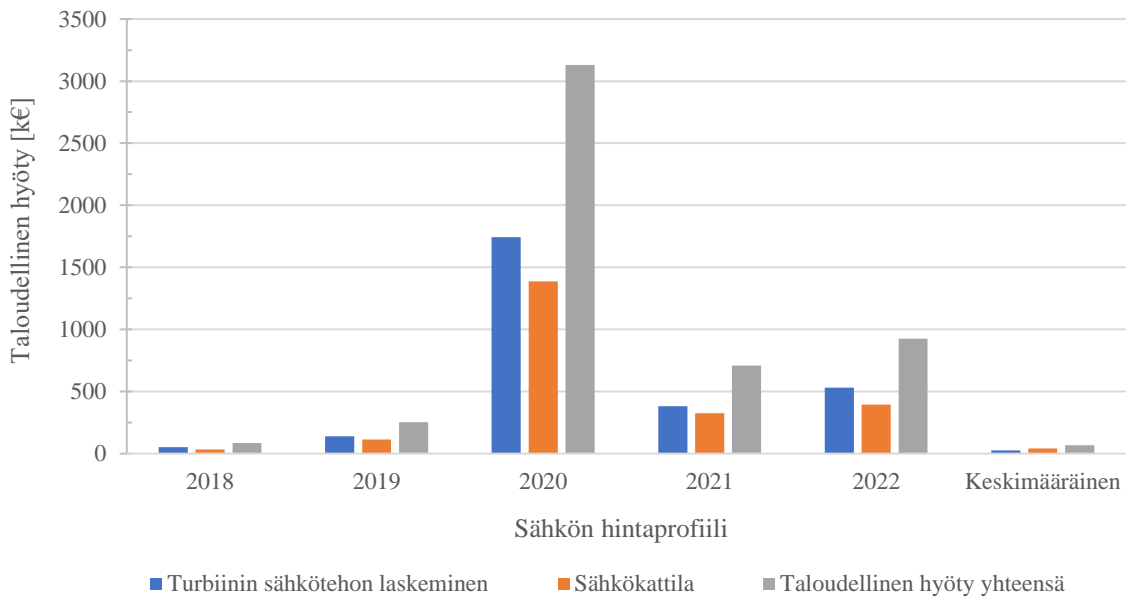
Taulukko 5. CHP-laitoksen tuottama lämpö- ja sähköenergia, polttoaineen kulutus ja sähkökattilan tuottama lämpöenergia normaalilla vastapaineajolla sekä sähkön eri hintaprofiileilla mallinnettuna.

	Normaali vastapaineajo	2018	2019	2020	2021	2022	KM*
CHP lämpöenergia [GWh]	782	779	773	662	743	744	773
CHP sähköenergia [GWh]	282	278	274	182	253	249	277
CHP polttoaineen kulutus [GWh]	1363	1355	1343	1082	1277	1274	1346
Sähkökattila lämpöenergia [GWh]	0	3	9	120	39	38	9

* KM = Keskimääräinen sähkön hintaprofiili.

Sähkön hinta vaikuttaa suoraan sähkökattilan käyttöön. Vuosina 2018 ja 2019 sähkön keskimääräinen hinta oli 46,8 €/MWh ja 44,0 €/MWh, joka on selvästi matalampi kuin vuosina 2021 ja 2022, jolloin sähkön keskimääräinen hinta oli 72,3 €/MWh ja 154,0 €/MWh (Nord Pool 2023). Tästä huolimatta vuosien 2021 ja 2022 hintaprofiileilla mallinnettuna sähkökattilaa on käytetty enemmän. Vaikka vuosina 2018 ja 2019 sähkön keskimääräinen hinta oli matalampi, kyseisillä hintaprofiileilla sähkökattilan käytölle otollisia tunteja on vähän. Vuosina 2021 ja 2022 sähkön hintavolatiliteetti on ollut suurempi ja edullisia tunteja on ollut enemmän, jonka seurauksena sähkökattilaa on ollut mahdollista käyttää enemmän. Vuonna 2020 sähkön hinta oli poikkeuksellisen alhainen, joka selittää sähkökattilan runsasta käyttöä. Sähkön hinnan lisäksi sähkökattilan käyttöön vaikuttavat kattilan minimikuorma ja CHP-laitoksen muuttuvat kustannukset.

Kuvassa 26 on esitetty taloudellinen hyöty sähkön eri hintaprofiileilla. Taloudellinen hyöty on jaettu turbiinin sähkötehon laskemisella ja sähkökattilan käytöllä saavutettaviin hyötyihin. Turbiinin sähkötehon laskemisen vaikutus on vuosien 2018–2022 sähkön hintaprofiileilla suurempi kuin sähkökattilan vaikutus, mutta keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna sähkökattilan vaikutus on suurempi. Turbiinin sähkötehon laskeminen laskee sähkökattilan potentiaalia. Jos turbiinin sähkötehoa ei lasketa, sähkökattilan potentiaali kasvaa, mutta saavutettava kokonaishyöty on pienempi. Vuosien 2018, 2019 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla saavutettava taloudellinen hyöty on pienempi, noin 70–250 k€. Vuosien 2021 ja 2022 sähkön hintaprofiileilla taloudellinen hyöty on noin 710 k€ ja 930 k€ sekä vuoden 2020 hintaprofiililla noin 3130 k€.



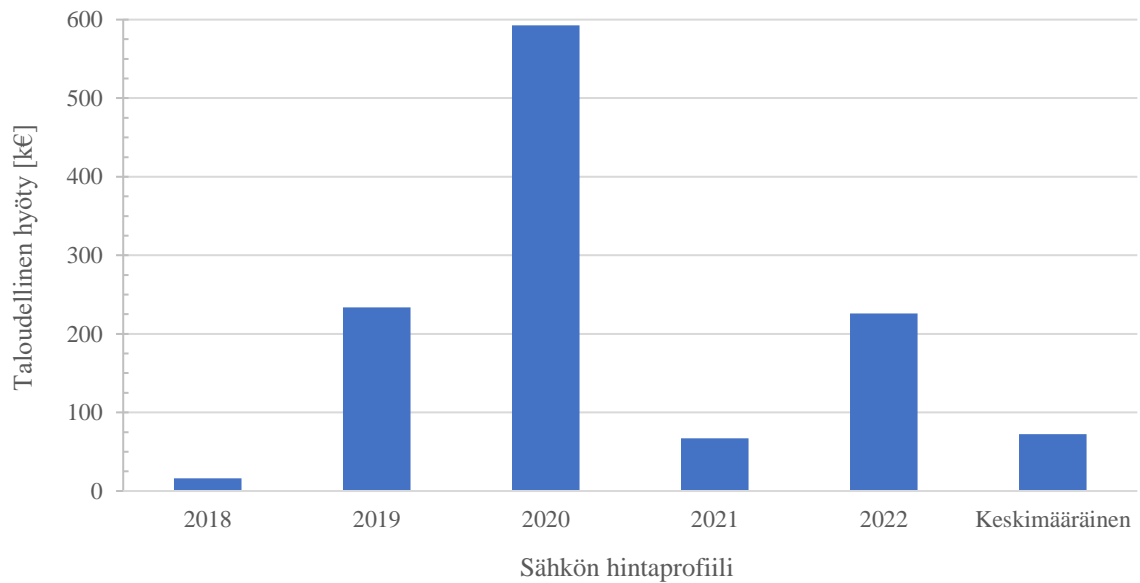
Kuva 26. Turbiinin sähkötehon laskemisen ja sähkökattilan vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Sähkökattilan käyttöä tarkasteltiin myös kesällä, kun CHP-laitos ei ole käynnissä. Taulukossa 6 on esitetty kaukolämmön tarve ja kaukolämmön tuotannon jakautuminen muun kaukolämmön tuotannon ja sähkökattilan kesken sähkön eri hintaprofiileilla. Kaukolämpöenergian tarve riippuu karkeasti arvioidusta kaukolämpökuormasta ja ajasta, jolloin CHP-laitos ei ole käynnissä. Vuosien 2019 ja 2020 hintaprofiileilla sähkökattilan käyttö on muita vuosia runsaampaa. Vuoden 2018 hintaprofiililla sähkökattilan käyttö on erityisen vähäistä.

Taulukko 6. Sähkökattilan käyttö, kun CHP-laitos ei ole käynnissä.

Sähkön hintaprofiili	2018	2019	2020	2021	2022	KM
Kaukolämmön tarve [GWh]	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4
Muu KL tuotanto [GWh]	36,5	18,2	11,1	34,1	31,7	32,6
Sähkökattilan tuotanto [GWh]	2,9	21,2	28,3	5,3	7,7	6,8

Taloudellinen hyöty muun kaukolämmön tuotannon korvaamisesta sähkökattilalla ajalta, kun CHP-laitos ei ole käynnissä, on esitetty kuvassa 27. Vuosien 2018, 2021 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla taloudellinen hyöty on noin 15–70 k€ välillä. Vuosien 2019 ja 2022 sähkön hintaprofiileilla taloudellinen hyöty on noin 230 k€ sekä vuoden 2020 hintaprofiililla noin 590 k€.



Kuva 27. Sähkökattilalla saavutettava taloudellinen hyöty, kun CHP-laitos ei ole käynnissä.

Taloudellinen hyöty on suoraan verrannollinen sähkökattilan käyttökustannuksiin, jotka muuttuvat sähkön hinnan mukaan. Vuoden 2019 hintaprofiililla sähkökattilalla tuotettu kaukolämpö on karkeasti lähes 3-kertainen verrattuna vuoden 2022 hintaprofiilin mallinnukseen. Tästä huolimatta vuoden 2022 hintaprofiililla taloudellinen hyöty on lähes yhtä suuri kuin vuoden 2019 hintaprofiililla. Tämä kertoo siitä, että vuonna 2022 sähkö on ollut huomattavasti edullisempaa, kun sähkökattilaa on käytetty (liite 4, taulukot 4 ja 5). Yksi selittävä tekijä on mitä luultavimmin sähkön lisääntynyt hintavolatiliteetti.

Tarkastelu on tehty puhtaasti muuttuvien kustannuksien perusteella, mutta todellisuudessa sähkökattilan käytölle voi olla muita rajoitteita. Muuta kaukolämmöntuotantoa ei esimerkiksi välttämättä haluta ajaa kokonaan alas, jolloin sähkökattila ei voi tuottaa koko kaukolämpöverkon tarvitsemaa tehoa tietyllä hetkellä. Sähkökattilan toiminnan tarkastelu osana kaukolämpöjärjestelmää vaatisi syvempää perehtymistä koko kaukolämpöjärjestelmään.

Herkkyystarkastelu

Sähkökattilan käytön mallinnuksen yhteydessä tutkittiin myös, kuinka CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien muutos vaikuttaa sähkökattilan käyttöön. Lähtötilanteessa muuttuvat kustannukset olivat 30 €/MWh ja niitä muutettiin 5 €/MWh kumpaankin suuntaan. Taulukossa 7 on esitetty muuttuvien kustannuksien vaikutus sähkökattilan käyttöön ja saavutettavaan taloudelliseen hyötyyn keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna.

Taulukko 7. CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien vaikutus sähkökattilan käyttöön ja taloudelliseen hyötyyn.

CHP muuttuva kustannus [€/MWh]	25	30	35
CHP lämpöenergia [GWh]	780	773	759
CHP sähköenergia [GWh]	281	277	267
CHP polttoaineen kulutus [GWh]	1360	1346	1316
Sähkökattila lämpöenergia [GWh]	2	9	23
Taloudellinen hyöty [k€]	11	68	261

Kuten havaitaan, CHP-laitoksen muuttuvilla kustannuksilla on suuri vaikutus sähkökattilan käyttöön ja taloudellisiin hyötyihin. Mitä matalammat CHP-laitoksen muuttuvat kustannukset ovat, sitä matalampi on sähkön hinta, jolloin sähkökattilaa on mahdollista käyttää. Muuttuvien kustannuksien ollessa 25 €/MWh sähkökattilalla tuotettu lämpöenergia on noin 2 GWh ja taloudellinen hyöty noin 11 k€. Vastaavasti muuttuvien kustannuksien ollessa 35 €/MWh sähkökattilalla tuotettu lämpöenergia on noin 23 GWh ja taloudellinen hyöty noin 260 k€.

Tulokset osoittavat, että sähkökattilalla saavutettava taloudellinen hyöty vaihtelee suuresti sähkön eri hintaprofiileilla. Sähkön hintakehitys on epävarmaa, mutta suuri hintavolatili-teetti on luultavasti tullut pysyäkseen. Sähkökattilan käytön kannattavuus vaatii riittävästi edullisia tunteja ja vapaata lämpökuormaa. Turbiinin sähkötehon laskeminen laskee CHP-laitoksen kattilan kuormaa, joka joissakin tapauksissa rajoittaa sähkökattilan käyttöä. Mikäli polttoaineiden hinnat jatkavat kasvuaan, sähkökattilan kilpailukyky kasvaa. Jos sähkön hinta on korkea, sähkökattilan käyttö ei ole kannattavaa.

Turbiinin sähkötehon laskeminen ja sähkökattilan käyttö lisäävät CHP-laitoksen lämpö- ja sähkötehon heiluntaa. Tämänkaltainen syklinen ajo lisää luultavasti kunnossapidon tarvetta ja kustannuksia. Kasuvia kunnossapitokustannuksia ei ole otettu huomioon tässä mallinnuksessa. Sähkökattilainvestointia suunniteltaessa asiaa tulisi pohtia tarkemmin. Vaihtoehtoisesti CHP-laitos voitaisiin ajaa kokonaan alas sähkön ollessa edullista pitkään, esimerkiksi viikonlopun yli ja tuottaa kaikki lämpö sähkökattilalla. Tätä mahdollisuutta ei kuitenkaan ole tarkasteltu tässä työssä.

6.2 Kaukolämpöakku

Tässä esimerkkilaskennassa tarkastellaan kaukolämpöakun toimintaa CHP-laitoksen sähkötuotantoa optimoivana komponenttina. Kaukolämpöakun toimintaa tarkastellaan vuosien 2018–2022 sähkön tuntihintatiedoilla sekä kyseisten vuosien avulla lasketulla keskimääräisellä tuntihintaprofiililla. Kaukolämpöakku ladataan kello 8–20 välisenä aikana ja puretaan kello 20–8 välisenä aikana. Ajotapa perustuu siihen, että sähkön kalleimmat yhtäjaksoiset 12 tunnin jaksot ovat osuneet keskimäärin kello 8–20 väliselle ajalle vuosina 2018–2022. Kaukolämpöakun tapauksessa käytössä on vastaavat ajotavat kuin sähkökattilan mallinnuksessa. Turbiinin sähkötehoa lasketaan sähkön hinnan laskiessa 10 €/MWh CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien alapuolelle vastaavalla tavalla kuin sähkökattilan tapauksessa.

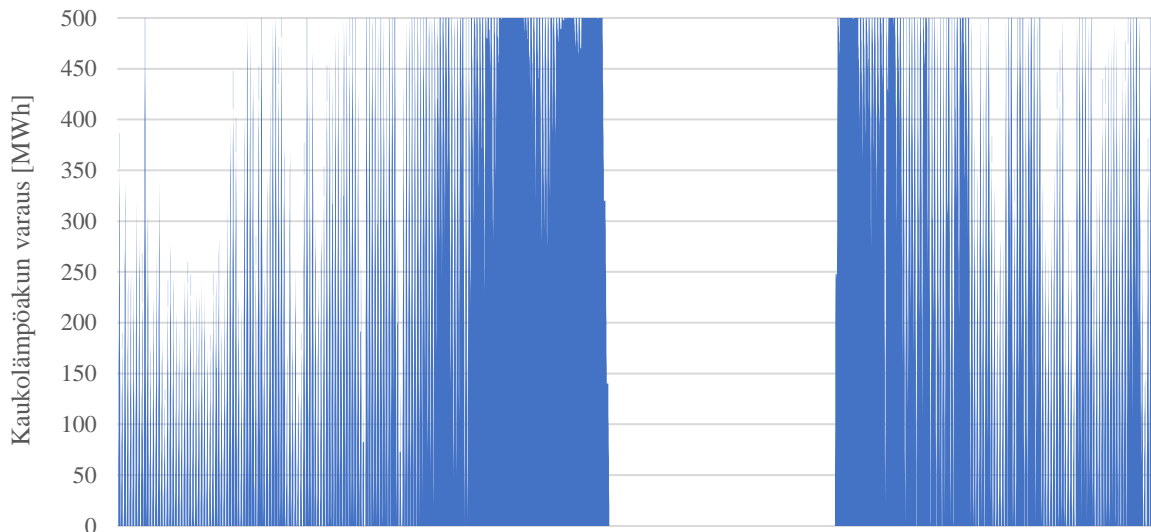
Lataus- ja purkutehoa ei ole optimoitu vaan akku ladataan ja puretaan aina suurimmalla mahdollisella teholla rajoitukset huomioiden. Kaukolämpöakku ei ladata, jos sähkön hinta on matalampi kuin sähköntuotannon muuttuvat kustannukset, koska tällöin sähkötehoa ei ole kannattavaa lisätä. Kaukolämpöakun latausta rajoittaa laitoksen maksimi kaukolämpöteho. Oletuksena on, että kattilan maksimikuorma ei tule kaukolämpöakun latauksen rajoitteeksi, koska maksimi kaukolämpöteho tulee ensin rajoitteeksi. Kaukolämpöakun purkua rajoittavat laitoksen minimi kaukolämpöteho ja kattilan minimi lämpöteho. Kattilan minimikuormaa ei haluta alittaa, koska se lisää apujäähdytyksen tai -lauhdutuksen tarvetta.

Kaukolämpöakun lataus- ja purkutehoksi on valittu 50 MW ja kapasiteetiksi 500 MWh. Edellä mainitut arvot on arvioitu karkeasti, sillä tämän työn tarkoituksena ei ole löytää optimaalista lataus- ja purkutehoa tai kapasiteettia. Mallinnusta kuitenkin testattiin erilaisilla vaihtoehtoilla. Herkkyystarkastelussa tutkittiin kaukolämpöakun kapasiteetin, lataus- ja purkutehon sekä CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien muutoksien vaikutusta kaukolämpöakulla saavutettaviin taloudellisiin hyötyihin.

Taloudellista hyötyä saavutetaan, kun turbiinin sähkötehoa lasketaan sähkön ollessa edullista. Lisäksi kaukolämpöakun lataus kasvattaa sähkötehoa sähkön ollessa kalliimpaa, jolloin sähkön myynnistä saatava voitto kasvaa. Kaukolämpöakun purku puolestaan vähentää sähkötehoa ja ajoittuu keskimäärin edullisimmille tunneille.

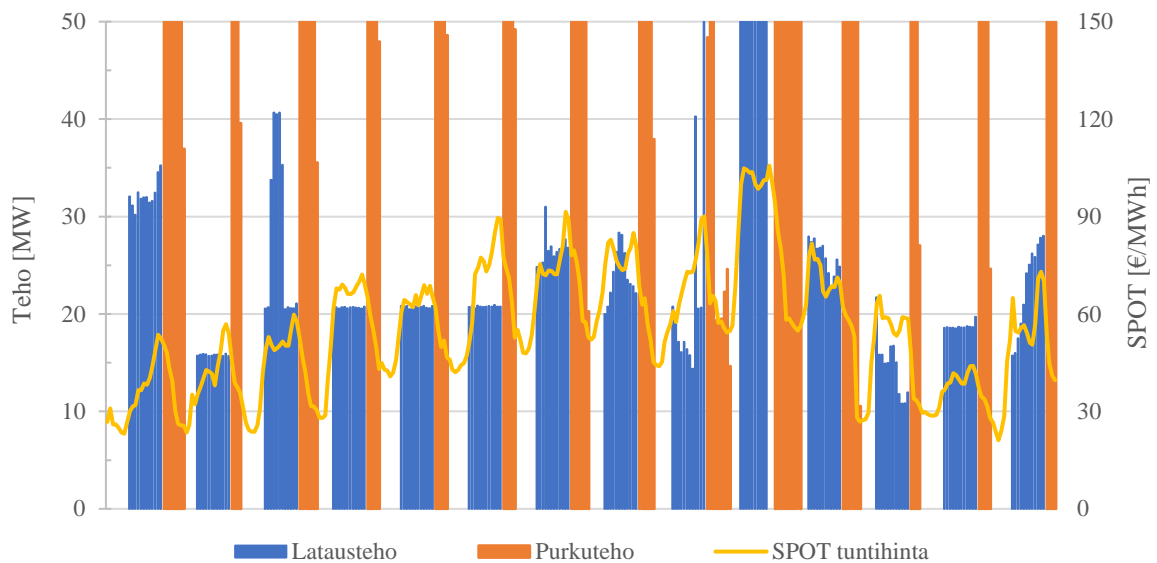
Tulokset

Kaukolämpöakun varauksen käyttäytyminen vuoden aikana keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna on esitetty kuvassa 28. Etenkin alkuvuodesta kaukolämpökuorma on korkea, jolloin laitoksen maksimi kaukolämpöteho rajoittaa latausta. Alku- ja loppuvuodesta lämpökuorma on korkealla, jolloin purun rajoitukset tulevat harvoin vastaan. Keväällä, alkukesällä ja syksyllä akun varaus pysyy korkealla ja on paikoitellen täysi hieman pidempiäkin aikoja. Tällöin akkua ei saada purettua riittävästi, koska lämpökuorman laskiessa purun rajoitteet, kuten kattilan minimikuorma tulevat vastaan. Lämpökuorman ollessa matalalla lataustehon rajoitteet tulevat puolestaan harvoin vastaan.



Kuva 28. Kaukolämpöakun varauksen käyttäytyminen vuoden aikana keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna.

Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho vuoden kahden ensimmäisen viikon ajalta keskimääräisellä hintaprofiililla mallinnettuna on esitetty kuvassa 29. Kiinteät lataus- ja purkujaksot näyttävät osuvan kohtuullisen hyvin yhteen sähkön hinnan kanssa. Sähkön hinnan ollessa korkeampi, akkua ladataan ja hinnan ollessa matalampi, akkua puretaan. Lataus- ja purkujaksot ovat 12 tunnin mittaisia, mutta tämä ei aina toteudu, koska lataus- ja purkutehoa ei optimoitu. Lataus- ja purkuteho on aina suurin mahdollinen rajoitteet huomioiden, joten akun varauksesta riippuen lataus- ja purkujaksot voivat olla vain muutamankin tunnin mittaisia. Kuten aiemmin todettiin, alkuvuodesta latausta rajoittaa korkea kaukolämpökuorma.



Kuva 29. Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho vuoden kahtena ensimmäisenä viikkona keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna.

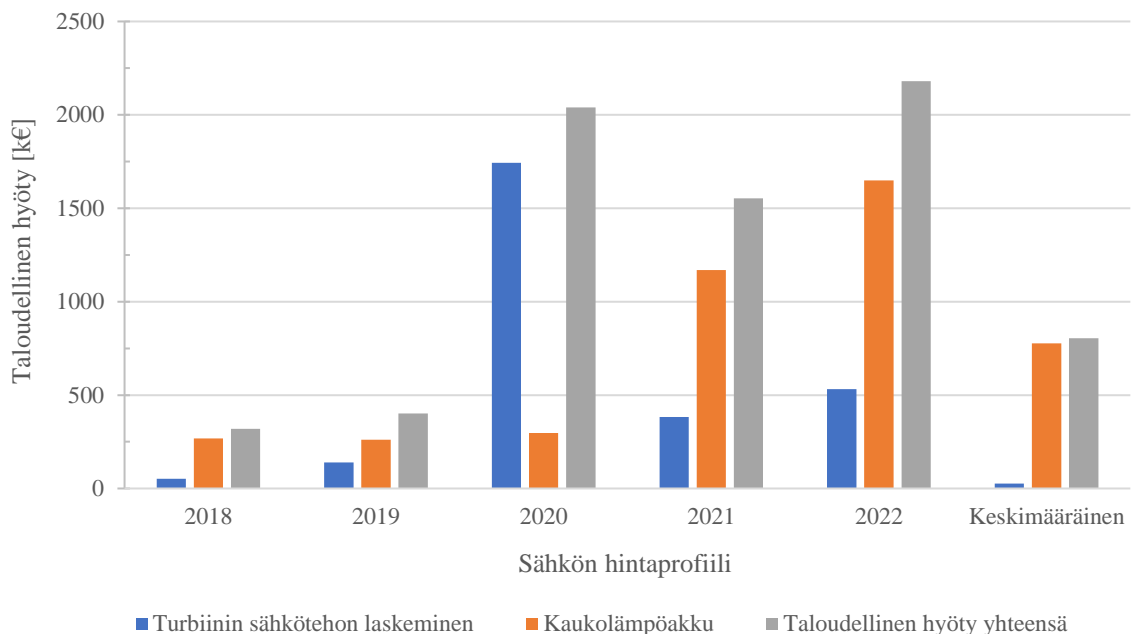
Taulukossa 8 on esitetty CHP-laitoksen tuottama lämpö- ja sähköenergia, polttoaineen kulutus ja kaukolämpöakkuun ladattu lämpöenergia sähkön eri hintaprofiileilla mallinnettuna normaaliin vastapaineajoon verrattuna. Kaukolämpöakkuun ladattu lämpöenergia on suhteellisen samansuuruinen jokaisella sähkön hintaprofiililla lukuun ottamatta vuotta 2020. Sähkön poikkeuksellisen matalan hinnan seurauksena vuoden 2020 hintaprofiililla sähkötehoa ei toisinaan kannata lisätä, jolloin kaukolämpöakun käyttö on vähäisempää.

Taulukko 8. CHP-laitoksen tuottama lämpö- ja sähköenergia, polttoaineen kulutus ja kaukolämpöakkuun ladattu lämpöenergia normaalilla vastapaineajolla sekä sähkön eri hintaprofiileilla mallinnettuna.

	Normaali vastapaineajo	2018	2019	2020	2021	2022	KM
CHP lämpöenergia [GWh]*	782	783	783	783	783	782	783
CHP sähköenergia [GWh]	282	280	276	198	263	255	280
CHP polttoaineen kulutus [GWh]	1363	1362	1358	1257	1340	1330	1363
KL-akkuun ladattu lämpöenergia [GWh]	0	83	84	45	74	75	84

* CHP-laitoksella tuotetun lämpöenergian pitäisi olla sama jokaisessa kohdassa, koska lämmöntarve pysyy vakiona. Ero johtuu siitä, että kaukolämpöakkuun jää varausta vuoden lopussa.

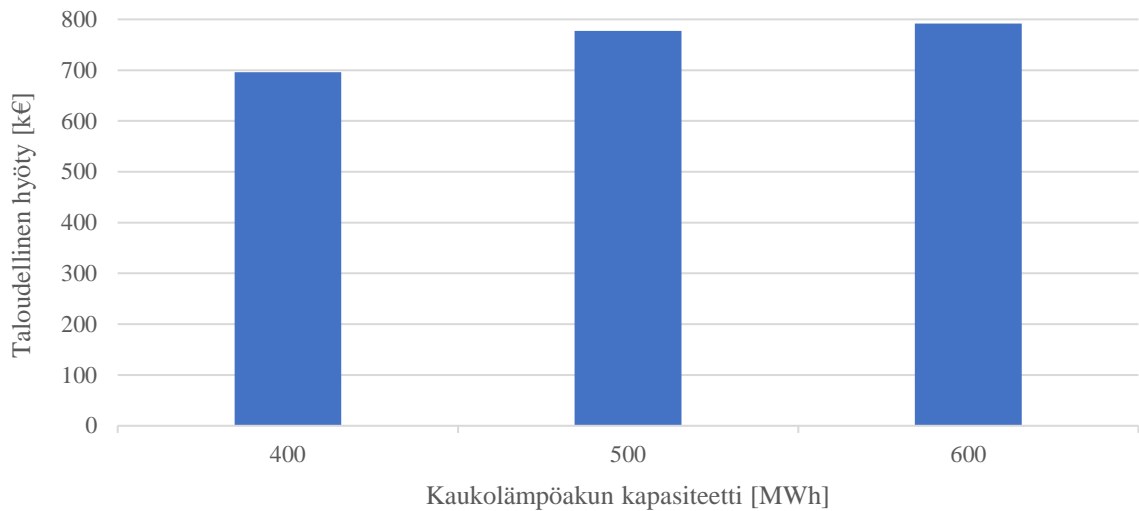
Turbiinin sähkötehon laskemisen ja kaukolämpöakun käytön taloudellinen hyöty sähkön eri hintaprofiileilla on esitetty kuvassa 30. Kaukolämpöakulla saavutettava hyöty on kaikkien vuosien sähkön hintaprofiileilla suurempi, paitsi vuoden 2020. Kyseisenä vuonna sähkön hinta oli poikkeuksellisen alhainen, jolloin turbiinin sähkötehoa kannattaa rajoittaa ja kaukolämpöakua ei kannata käyttää sähkötehon kasvattamiseen. Sähkön hinnan ollessa matala kaukolämpöakulla saavutettava hyöty on selvästi pienempi. Vuosien 2021 ja 2022 sähkön hintaprofiileilla saavutettava taloudellinen hyöty on suuri, mutta myös keskimääräisellä hintaprofiililla hyöty on kohtuullinen.



Kuva 30. Turbiinin sähkötehon laskemisen ja kaukolämpöakun taloudellinen hyöty.

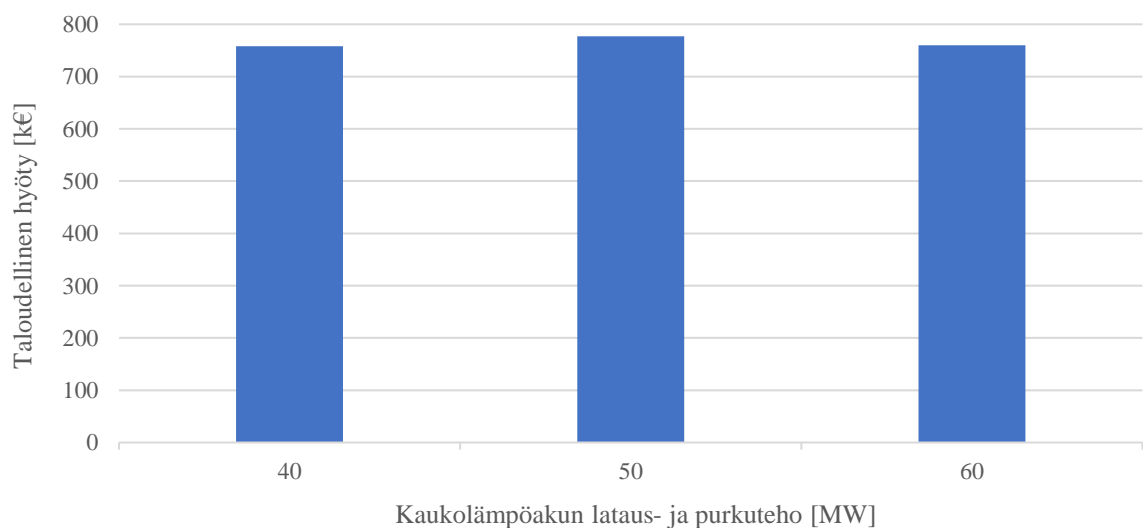
Herkkyystarkastelu

Kuvassa 31 on esitetty kaukolämpöakun kapasiteetin vaikutus kaukolämpöakulla saavutettavaan taloudelliseen hyötyyn keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna. Ero 500 MWh:n ja 600 MWh:n kapasiteettien välillä on pienempi kuin ero 400 MWh:n ja 500 MWh:n välillä. Kapasiteetin kasvun tuoma lisäarvo 500 MWh:n ja 600 MWh:n välillä on niin pieni, että 500 MWh:n kapasiteetti olisi luultavasti järkevämpi valinta. Kapasiteetin lisääminen 100 MWh:lla kasvattaa investointikustannuksia reilusti, jos oletetaan, että kapasiteettia lisätään kasvattamalla kaukolämpöakun tilavuutta.



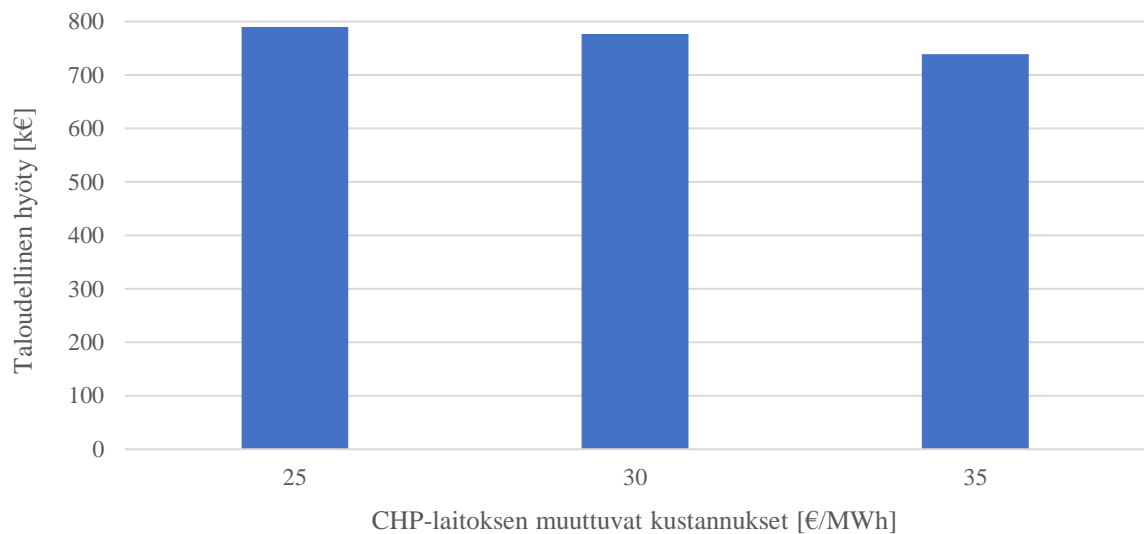
Kuva 31. Kaukolämpöakun kapasiteetin vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Kaukolämpöakun lataus- ja purkutehon vaikutus kaukolämpöakulla saavutettavaan taloudelliseen hyötyyn keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna on esitetty kuvassa 32. Lataus- ja purkutehon ollessa 50 MW saavutetaan suurin taloudellinen hyöty. Tämä johtuu siitä, että mallinnuksessa lataus- ja purkutehoa ei optimoitu, vaan teho on aina suurin mahdollinen rajoitteet huomioiden. Lataus- ja purkutehon ollessa 40 MW, akkua ei esimerkiksi ehditä toisinaan purkaa riittävästi, jolloin lataukselle ei jää tilaa, koska akun varaus tulee täyteen. Toisaalta lataus- ja purkutehon ollessa 60 MW, esimerkiksi kaikkia lataustunteja ei kyetä hyödyntämään, koska akun varaus täyttyy ennen sitä.



Kuva 32. Kaukolämpöakun lataus- ja purkutehon vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien vaikutus taloudelliseen hyötyyn keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla mallinnettuna on esitetty kuvassa 33. Muuttuvien kustannuksien kasvaessa kaukolämpöakulla saavutettava taloudellinen hyöty laskee. Tämä johtuu siitä, että kaukolämpöä ladataan vain silloin, kun sähkön hinta on korkeampi kuin CHP-laitoksen muuttuvat kustannukset. Mitä korkeammat CHP-laitoksen muuttuvat kustannukset ovat, sitä vähemmän mahdollisia lataustunteja kaukolämpöakulla on.



Kuva 33. CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Tulokset osoittavat, että kaukolämpöakun avulla voidaan saavuttaa suuria taloudellisia hyötyjä. Kaukolämpöakku on parhaimmillaan, kun sähkön hintavaihtelu vuorokauden aikana on suurta. Tällöin sähköntuotantoa voidaan lisätä korkeilla sähkön hinnoilla ja laskea matalilla sähkön hinnoilla, joka parantaa sähköntuotannon kannattavuutta. Kaukolämpökulle on oltava riittävästi vapaata lataus- ja purkutehoa, jotta sen käyttö on järkevää. Esimerkiksi tässä tapauksessa kaukolämpöakun latausta alku- ja loppuvuodesta rajoittavat korkea kaukolämpökuorma sekä purkua keväällä, alkukesällä ja syksyllä kattilan minimikuorma.

Kaukolämpöakun kapasiteetin, lataustehon tai CHP-laitoksen muuttuvien kustannuksien muutokset eivät vaikuta merkittävästi kaukolämpöakulla saavutettavaan taloudelliseen hyötyyn. Kaikissa tapauksissa hyöty on noin 700 k€ ja 800 k€ välillä. Esimerkiksi kapasiteetin kasvattaminen 100 MWh:lla ei välttämättä tuo riittävästi lisäarvoa, koska kapasiteetin kasvattaminen nostaa kaukolämpöakun investointikustannuksia reilusti.

6.3 Kuoren kuivaus

Tässä esimerkkilaskennassa tarkastellaan kuoren kuivausta viirakuivurilla. Kiinnostuneita ollaan siitä, kuinka paljon kuivaus nostaa kuoren energiamäärää ja kuinka suuri on kuivauksesta saatava taloudellinen hyöty. Kuivausta tarkastellaan vuoden aikajaksolla kuukausittain, mutta kiinnostuneita ollaan myös puupolttoaineen kuivauksesta ainoastaan kesällä, jolloin kuivattu polttoaine varastoidaan myöhemmin käytettäväksi. Taulukossa 9 on esitetty kuivattavan kuoren määrä, lähtökosteus ja sähkön hinta eri kuukausina. Sähkön hinta on eri kuukausien keskihintojen keskiarvo vuosilta 2018–2022 (Nord Pool 2023).

Taulukko 9. Kuoren määrä, kosteus ja sähkön hinta kuukausittain.

Kuukausi	Kuivattavan kuoren määrä [t]	Lähtökosteus [%]	Sähkön hinta [€/MWh]
Tammikuu	31 000	59,0	55,6
Helmikuu	28 000	59,0	50,5
Maaliskuu	31 000	58,0	46,2
Huhtikuu	30 000	56,0	43,5
Toukokuu	31 000	52,0	55,3
Kesäkuu	30 000	50,0	60,5
Heinäkuu	28 000	50,0	76,6
Elokuu	31 000	53,0	94,9
Syyskuu	30 000	54,0	88,4
Lokakuu	21 000	56,0	60,4
Marraskuu	30 000	57,0	80,9
Joulukuu	31 000	57,0	113,9

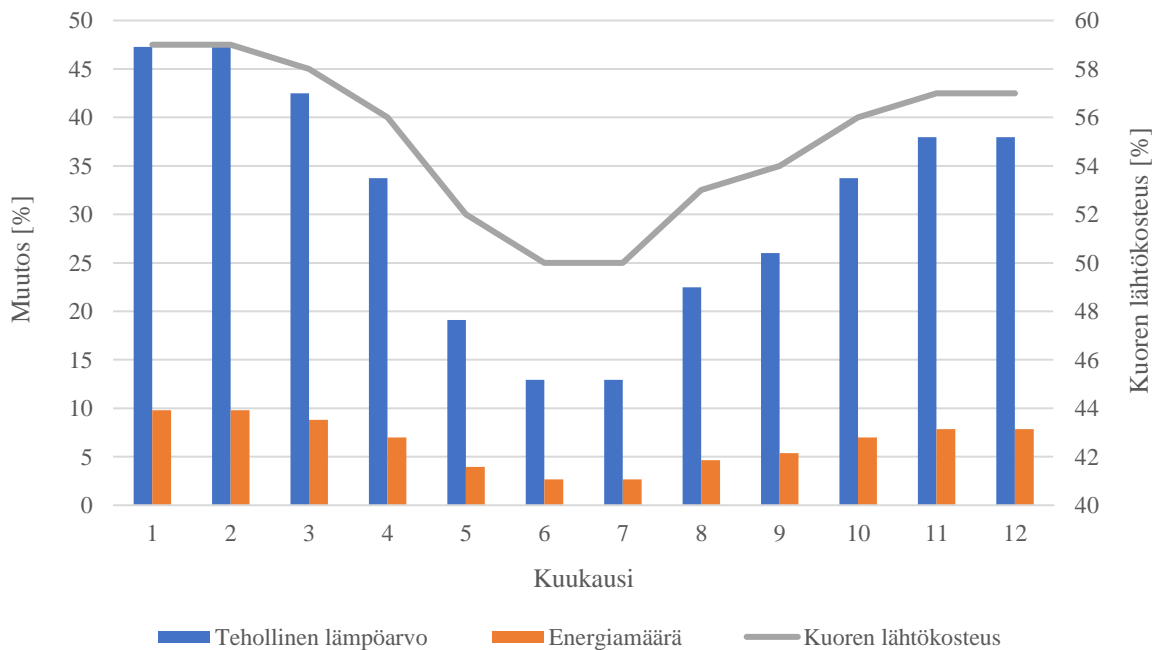
Loput laskennassa käytetyistä lähtöarvoista on esitetty taulukossa 10. Kuori kuivataan 45 % loppukosteuteen, joka vastaa karkeasti turpeen ja metsähakkeen kosteutta (Alakangas et al. 2016, 205). Korvattavan polttoaineen ajatellaan olevan metsähaketta, jonka hinta vuoden 2022 viimeisellä neljänneksellä oli noin 27 €/MWh (Suomen virallinen tilasto 2023). Kuivuria ei mitoiteta tässä työssä, vaan kuivurille käytetään viirakuivurille tyypillistä lämmön- ja sähkönkulutusta. Kuivurin ominaislämmön ja sähkötehon kulutukset sekä kunnossapitokustannukset on arvioitu karkeasti kirjallisuuden perusteella ja Valmetin kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta. (Fagernäs et al. 2010, 1274; Havu 2023; Holmberg 2020, 144.)

Taulukko 10. Kuoren kuivauksen laskennassa käytettyjä lähtöarvoja.

Kuoren kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo	19 MJ/kg
Kuoren loppukosteus	45 %
Korvattavan polttoaineen hinta	27 €/MWh
Kuivauslämmön kustannus	5 €/MWh
Kuivurin kunnossapitokustannukset	50 000 €/a
Kuivurin sähkötehon kulutus	325 kW
Kuivurin ominaislämmön kulutus (talvi / syksy, kevät / kesä)	6 / 5,25 / 4,5 MJ/kgH ₂ O

Tulokset

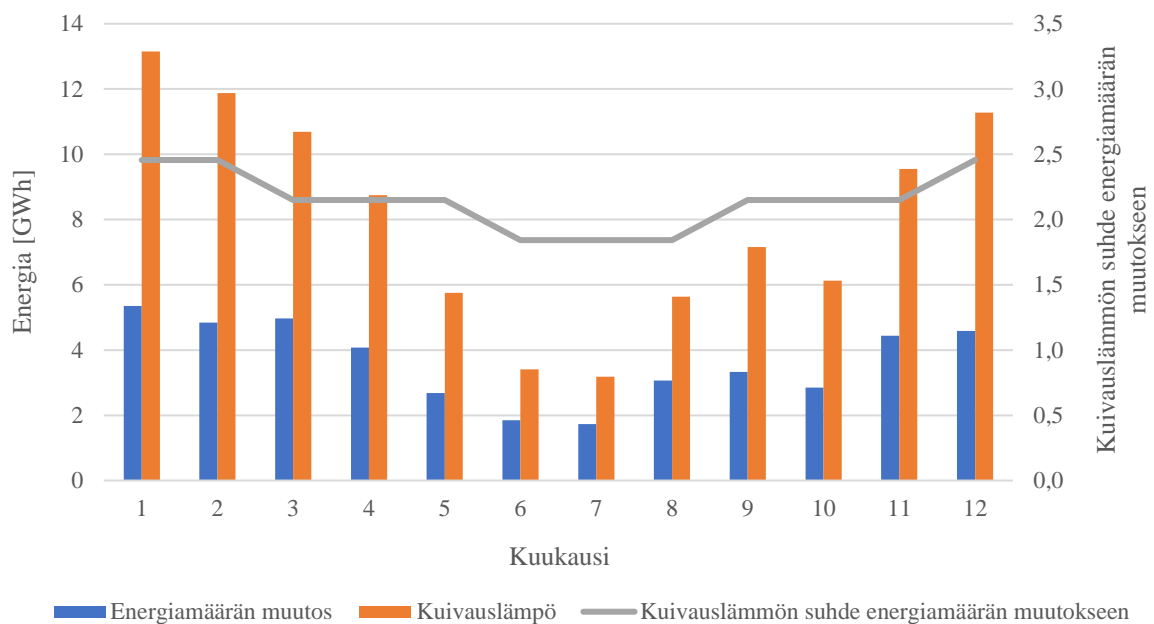
Laskennan tuloksia on esitetty kuvissa 34 ja 35 sekä taulukossa 11. Kuvassa 34 on esitetty kuoren tehollisen lämpöarvo ja energiamäärän muutos sekä kuoren lähtökosteus kuukausittain. Kuten havaitaan, kuoren tehollinen lämpöarvo kasvaa huomattavasti enemmän, kuin kuoren sisältämä energiamäärä. Tehollinen lämpöarvo kasvaa parhaimmillaan yli 45 %, kun vastaavasti kuoren energiamäärä ainoastaan parhaimmillaan noin 10 %. Tämä johtuu siitä, että kuoren massa pienenee kuivattaessa kuoresta höyrystyvän veden verran.



Kuva 34. Kuoren tehollisen lämpöarvon ja energiamäärän muutos sekä polttoaineen lähtökosteus kuukausittain.

Tehollisen lämpöarvon kasvu tarkoittaa käytännössä sitä, että samalla polttoaineen massavirralla saavutetaan suurempi polttoaineteho. Vastaavasti, jos polttoaineteho pidetään vakiona, saman polttoainetehon tuottamiseen tarvitaan pienempi polttoaineen massavirta. Laadukas polttoaine on tärkeää tilanteissa, joissa ollaan lähellä kattilan tehoalueen minimi- ja maksimiarvoa. Esimerkiksi liian kostealla polttoaineella ei välttämättä kyetä saavuttamaan kattilan maksimitehoa.

Kuvassa 35 on havainnollistettu kuoren sisältämän energiamäärän kasvua ja kuivauksen vaatimaa lämpöenergiaa. Korkeimmillaan kuivauslämmön tarpeen suhde kuoren sisältämän energiamäärä kasvuun on noin 2,5-kertainen ja matalimmillaan hieman alle 2-kertainen. Kuivaus kuluttaa paljon lämpöenergiaa ja tästä syystä kuivauslämmön tulisi olla edullista.



Kuva 35. Kuoren energiamäärän muutos, kuivauslämmön tarve sekä kuivauslämmön tarpeen suhde energiamäärän muutokseen.

Taulukossa 11 on esitetty kuoren sisältämän energiamäärän kasvu ja saavutettava taloudellinen hyöty vuodenajoinnain sekä koko vuoden aikana. Kuoren energiamäärä kasvaa kesäkuukausina kuivattaessa 6,6 GWh ja koko vuoden aikana noin 44 GWh. Korvattaessa metsähaketta kuoren kasvaneella energiamäärällä, saavutettava taloudellinen hyöty kesäkuukausina ovat yhteensä 50 k€ ja koko vuoden aikana noin 450 k€.

Taulukko 11. Kuoren energiamäärän kasvu ja taloudellinen hyöty vuodenajoinnain sekä koko vuonna.

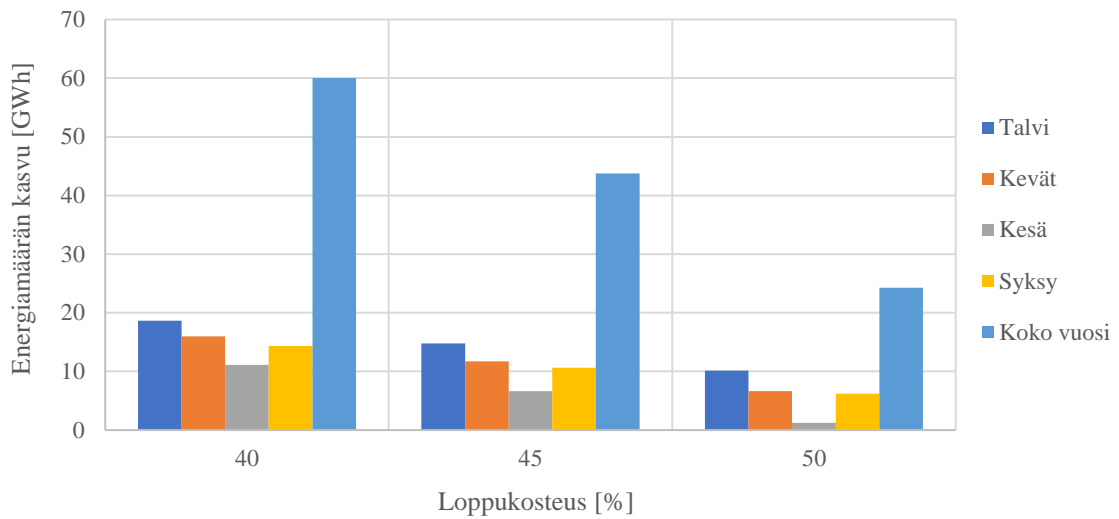
Aikajakso	Talvi	Kevät	Kesä	Syksy	Koko vuosi
Energiamäärän kasvu [GWh]	14,8	11,7	6,6	10,6	43,8
Taloudellinen hyöty [k€]	153	143	50	106	452

Kuivuri on miljoonaluokan investointi, joten tuloksien perusteella kuivurin hankkiminen ainoastaan kesäkäyttöön ei vaikuta kannattavalta. Toisaalta tällöin kuivuri voidaan mitoittaa pienemmäksi, jolloin myös investointi ja käyttökustannukset ovat pienempiä. Koko vuoden osalta kuivurissa on potentiaalia. Kuoren kosteus on matalammillaan kesällä, jonka vuoksi kesällä saavutettava hyöty jää pieneksi. Kuivauksen kannattavuutta voisi parantaa sekoittamalla kuoren joukkoon esimerkiksi lietettä, joka on hyvin kostea. Lisäksi, jos kuivauksella korvataan metsähakkeen sijaan esimerkiksi turvetta, potentiaali näyttää aivan erilaiselta.

Herkkyystarkastelu

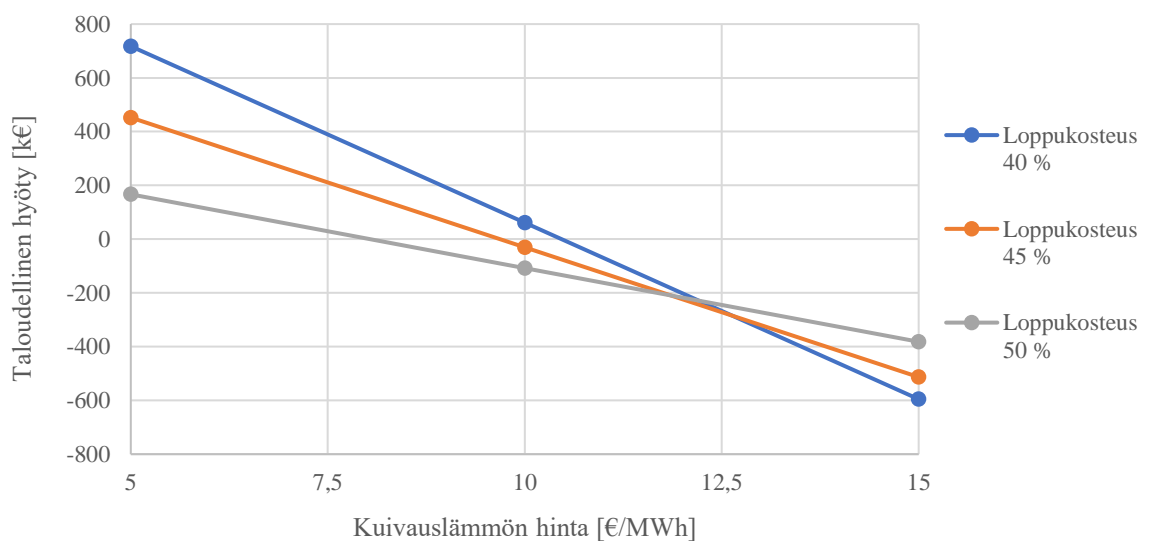
Kuoren kuivauksessa on tarkasteltu erilaisia tapauksia tutkimalla, kuinka lähtöarvojen muutokset vaikuttavat kuoren energiamäärän kasvuun ja taloudelliseen hyötyyn. Muutettuja arvoja ovat kuivatun polttoaineen loppukosteus, kuivauslämmön hinta ja korvattavan polttoaineen hinta. Taloudellinen hyöty on esitetty kuvaajissa ainoastaan koko vuodelle. Tarkemmat tulokset eri vuodenajoinnain löytyvät liitteestä 6.

Kuvassa 36 on esitetty, kuinka kuoren loppukosteus vaikuttaa energiamäärän kasvuun. Kuivattaessa kuori 40 % loppukosteuteen, energiamäärä kasvaa kesäkuukausina yhteensä noin 11 GWh ja koko vuonna 60 GWh. Vastaavasti kuivattaessa kuori 50 % loppukosteuteen, energiamäärä kasvaa kesäkuukausina vain noin 1,3 GWh ja koko vuonna 24 GWh. Verrattaessa tuloksia 45 % loppukosteuteen, muutokset energiamäärän kasvussa ovat suuria. Saavutettava taloudellinen hyöty 40 % loppukosteuteen kuivattaessa kesäkuukausina on yhteensä 130 k€ ja koko vuonna noin 720 k€. Vastaavasti 50 % loppukosteuteen kuivattaessa taloudellinen hyöty on kesäkuukausina yhteensä -13 k€ ja koko vuonna noin 170 k€. Loppukosteuden muutos vaikuttaa siis merkittävästi myös saavutettavaan taloudelliseen hyötyyn.



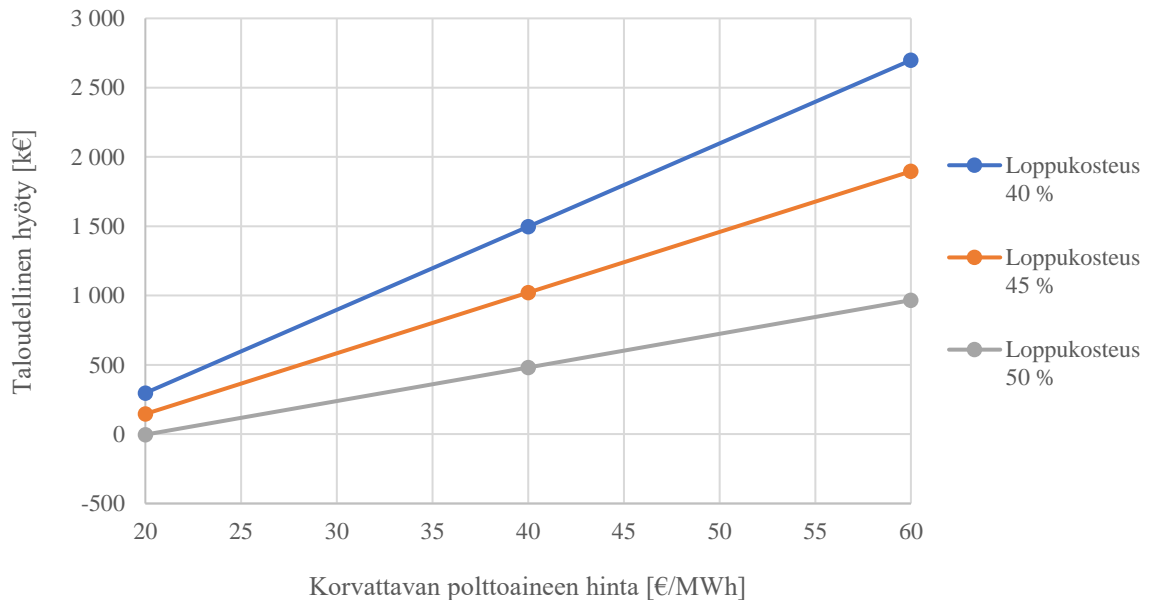
Kuva 36. Loppukosteuden vaikutus kuoren energiamäärän kasvuun.

Kuvassa 37 on esitetty kuivauslämmön hinnan ja loppukosteuden muutoksien vaikutus taloudelliseen hyötyyn. Taloudellinen hyöty on esitetty kuivauslämmön hinnan funktiona ja eri käyrät kuvaavat eri loppukosteuksia. Korvattavan polttoaineen hinta on 27 €/MWh. Kuivauslämmön hinnan kasvaessa taloudellinen hyöty laskee ja painuu negatiiviseksi. Käyrät leikkaavat toisensa, koska mitä pienempi loppukosteus on, sitä suuremmat kuivauskustannukset ovat. Lisäksi loppukosteuden ollessa 50 % kuivurin ei ole käytössä lainkaan kesä- ja heinäkuussa, koska myös lähtökosteus on 50 %, jolloin kuivaukselle ei ole tarvetta.



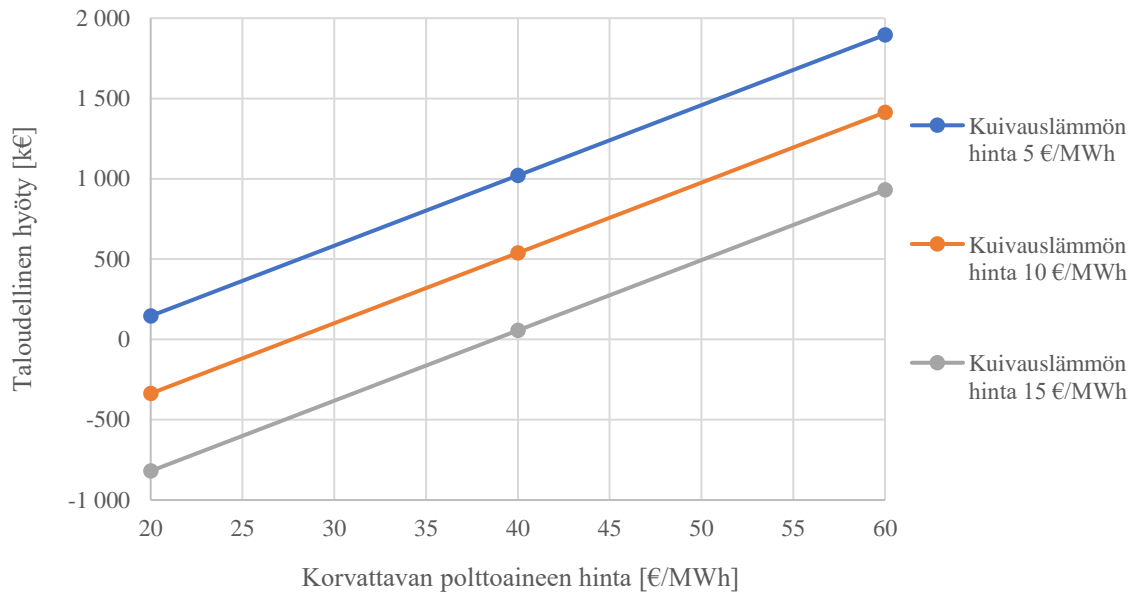
Kuva 37. Kuivauslämmön hinnan ja loppukosteuden vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Kuvassa 38 on esitetty taloudellinen hyöty korvattavan polttoaineen hinnan funktiona eri loppukosteuksilla. Kuivauslämmön hinta on 5 €/MWh. Korvattavan polttoaineen hinnan kasvaessa taloudellinen hyöty kasvaa sitä jyrkemmin, mitä pienempi loppukosteus on. Korvattavan polttoaineen hinnan ollessa korkea, voidaan vuositasolla saavuttaa suuriakin taloudellisia hyötyjä. Metsähakkeen hinta vuoden 2022 lopussa oli esimerkiksi noin 27 €/MWh ja turpeen hinta päästöoikeuksineen asettuu tällä hetkellä karkeasti noin 40–60 €/MWh välille. Vaikka loppukosteus olisi 50 %, taloudellinen hyöty on suuri, kunhan korvattavan polttoaineen hinta on riittävän korkea. Vastaavasti korvattavan polttoaineen hinnan ollessa esimerkiksi 20 €/MWh, taloudellinen hyöty on loppukosteudesta riippuen noin 0–300 k€.



Kuva 38. Korvattavan polttoaineen hinnan ja loppukosteuden vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Kuvassa 39 on esitetty taloudellinen hyöty korvattavan polttoaineen hinnan funktiona eri kuivauslämmön hinnoilla. Loppukosteutena on käytetty 45 %. Korvattavan polttoaineen hinnan kasvaessa taloudellinen hyöty kasvaa. Mitä matalampi kuivauslämmön hinta on, sitä suurempi on taloudellinen hyöty. Korvattavan polttoaineen hinnan ollessa matala, taloudellinen hyöty on pieni, jopa negatiivinen. Vastaavasti korvattavan polttoaineen hinnan ollessa korkea taloudellinen hyöty on suuri korkeasta kuivauslämmön hinnasta huolimatta.



Kuva 39. Korvattavan polttoaineen ja kuivauslämmön hinnan vaikutus taloudelliseen hyötyyn.

Yhteenvedon voidaan todeta, että polttoaineen kuivauksella voidaan saavuttaa suuria taloudellisia hyötyjä oikeassa toimintaympäristössä. Tärkeitä tekijöitä ovat kuivauslämmön hinta, korvattavan polttoaineen hinta ja loppukosteus. Kuivauslämmön hinnan kasvaessa taloudellinen hyöty laskee nopeasti ja on joissakin tapauksissa jopa negatiivinen. Korvattavan polttoaineen hinnan kasvaessa myös taloudellinen hyöty kasvaa nopeasti. Mitä kuivemmaksi kuori kuivataan, sitä suuremmat ovat kuivauskustannukset, mutta myös korvattavan polttoaineen määrä kasvaa. Huonoin yhdistelmä on korkea kuivauslämmön hinta ja loppukosteus sekä matala korvattavan polttoaineen hinta.

Kuoren kuivausta tutkittiin kuivaamalla kuori tiettyyn loppukosteuteen, tässä tapauksessa 40–50 % loppukosteuteen. Toinen vaihtoehto olisi ollut kuivata kuorta niin, että kosteus laskee tietyn prosenttiyksikön verran, esimerkiksi 10 tai 15 prosenttiyksikköä. Kyseisellä tavalla kuivauksen hyödyt jakautuisivat tasaisemmin koko vuodelle, jolloin myös kesällä kuoren kuivauksen potentiaali kasvaisi. Toisaalta kesällä kuoren kuivaaminen esimerkiksi 15 prosenttiyksiköllä voisi olla liikaa ja tuottaa haasteita kostealle polttoaineelle suunnitellulle kattilalle. Kuoren sekaan syötetään kuitenkin muutakin polttoainetta, kuten lietettä, joka nostaa polttoainesekoituksen kosteuspitoisuutta.

7 Teknologioiden potentiaali

Sähkökattilat ja lämpöpumput ovat kypsyyssasteeltaan kaupallisella tasolla. Sähkökattiloiden ja lämpöpumppujen teho on riittävä, mutta lämpöpumput vaativat pysyvän sekä suuritehoisen lämmönlähteen. Suuritehoisen lämmönlähteen löytäminen CHP-laitoksen läheisyydestä voi olla haastavaa. Lisäksi lämpöpumput kykenevät tuottamaan toistaiseksi vain hieman yli 100 °C lämpötilatason. Kuumalämpöpumppujen kehitys on kuitenkin ollut nopeaa viime vuosina ja korkeampia lämpötilatasoja saavuttavia lämpöpumppuja on tulossa todennäköisesti markkinoille lähivuosina. Sähkökattilat ovat investointikustannuksiltaan edullisempi vaihtoehto lämpöpumppuihin verrattuna, mutta lämpöpumppujen tehokkuus on parempi. Sähkökattiloiden potentiaali on tunnistettu, sillä useita sähkökattilainvestointeja on julkaistu viime vuosina.

Lämpövarastoista tuntuvan lämmön varastot ovat kehitetyin ja edullisin lämmönvarastointiteknologia. Vesi on yleisin varastointimateriaali 100 °C asti, mutta myös muita materiaaleja käytetään ja kehitetään jatkuvasti. Etenkin korkeammille lämpötiloille kiinteät materiaalit ja sulasuolat ovat potentiaalinen vaihtoehto, mutta kiinteiden materiaalien haasteena on usein heikommasta lämmönsiirrosta johtuva matalampi lataus- ja purkuteho. Latenttilämmön varastot ovat kaupallisella tasolla joidenkin faasimuutosmateriaalien osalta ja uusia faasimuutosmateriaaleja tutkitaan aktiivisesti. Tämän seurauksena latenttilämmön varastojen kaupalliset ratkaisut saattavat yleistyä lähivuosina. Termokemialliset energiavarastot ovat potentiaalinen teknologia suuren energiatihedden ja pienien häviöiden ansiosta, mutta vaativat kuitenkin vielä kehitystä kaupallisen tason saavuttamiseksi.

Perinteisten akkujen ja virtausakkujen katsottiin soveltuvan CHP-laitoksen yhteyteen sopiviksi sähkönvarastointiteknologioiksi. Kummatkin vaihtoehdot tarjoavat useiden tuntien purkuaikoja useiden megawattien teholla ja ovat vasteajaltaan nopeita. Perinteisiä akkuja on useita eri tyyppisiä ja uusia materiaaleja kehitetään aktiivisesti. Perinteisten akkujen heikkoutena on ollut korkea hinta sekä kapasiteetin laskun ikääntymisen seurauksena. Akkujen hinnat ovat kuitenkin laskeneet voimakkaasti viime vuosina. Virtausakut ovat potentiaalinen sähkönvarastointiteknologia suuren kokoluokan sovelluskohteisiin. Virtausakut ovat lähellä kaupallistumista ja joitakin projekteja on käynnissä maailmalla.

Puupolttoaineen kuivaukseen on tarjolla useita vaihtoehtoja. Viira- ja kiintopetikuivureissa käytettävä kuivauslämpötila on alhainen, jonka seurauksena hukkalämmöt sopivat lämmönlähteeksi. Toisaalta matala kuivauslämpötila kasvattaa tyypillisesti kuivurin kokoa, joka voi jossakin tilanteessa olla rajoittava tekijä. Muut kuivausteknologiat vaativat korkeamman kuivauslämpötilan. Viira- ja rumpukuivureille löytyy kaupallisia valmistajia, mutta kaskadi- ja pneumaattisille kuivureille niitä löytyy vähemmän. Kaskadi- ja pneumaattiset kuivurit ovat tehokkaita ja kompaktin kokoisia, mutta eroosio on usein ongelma. Kiintopetikuivurit ovat usein räätälöityjä ratkaisuja, jonka vuoksi kaupallisia toimittajia löytyy niukasti.

Esimerkkilaskennoissa käsitellyt sähkökattila, kaukolämpöakku ja puupolttoaineen kuivaus viirakuivurilla ovat kaikki koeteltua kaupallisen tason teknologiaa. Laskentojen tulokset osoittavat, että oikeassa toimintaympäristössä kyseisillä teknologioilla on mahdollistaa säästää suuria taloudellisia hyötyjä. Sähkökattila on parhaimmillaan, kun sähkön hinta on matala ja kaukolämpöakku on puolestaan parhaimmillaan, kun sähkön vuorokaudensisäiset hintavaihtelut ovat suuria. Turbiinin sähkötehon laskeminen laskee sähkökattilan potentiaalia, mutta yhdessä ne ovat kuitenkin toimiva yhdistelmä. Sähkökattilan käyttö kesällä, kun CHP-laitos ei ole käynnissä kasvattaa sähkökattilan potentiaalia. Työssä ei tarkasteltu sää-
tösähkömarkkinoilta saatavaa hyötyä, mutta sähkökattila ja kaukolämpöakku parantavat CHP-laitoksen kykyä osallistua säätösähkömarkkinoille.

8 Johtopäätökset

Power-to-heat teknologiat, energiavarastot ja puupolttoaineen kuivausteknologiat tarjoavat potentiaalisia vaihtoehtoja CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämiseen. Suurin osa käsitellyistä teknologioista on kaupallisella tasolla, mutta jotkin vaativat vielä kehitystä. Tekniikka kehittyy kuitenkin nopeasti, joten työssä käsiteltyjen teknologioiden kehitystä kannattaa seurata aktiivisesti kuitenkin unohtamatta muita teknologioita. Jatkuva kehittyminen muuttuvassa toimintaympäristössä on yksi avaintekijä kannattavalle toiminnalle.

Sähkökattilat vaikuttavat lämpöpumppuja potentiaalisemmalta vaihtoehdolta, sillä lämpöpumppuilla on lämpötilatasoon ja lämmönlähteeseen liittyviä rajoitteita. Lämpövarastoista tuntuvan lämmön varastot ovat kypsin ja edullisin lämmönvarastointiteknologia. Latenttilämmön varastot ovat kaupallisella tasolla joidenkin faasimuutosmateriaalien osalta ja kaupalliset ratkaisut saattavat lisääntyä lähivuosina. Termokemialliset energiavarastot vaativat vielä kehitystä kaupallisen tason saavuttamiseksi, mutta ovat potentiaalinen teknologia. Perinteiset akut ovat toistaiseksi toimivin sähkönvarastointiteknologia CHP-laitoksen yhteyteen, mutta myös virtausakut ovat potentiaalinen vaihtoehto. Puupolttoaineen kuivaukseen on tarjolla useita teknologioita, mutta viira- ja kiintopetikuivurit sopivat matalille kuivauslämpötiloille ja hukkalämmöille. Muita kuivurityyppejä ei kuitenkaan kannata sulkea pois tämän vuoksi, sillä ne voivat tarjota joitakin muita etuja, kuten kompaktia kokoa.

Sähkökattila on parhaimmillaan sähkön ollessa edullista. Sähkökattila kasvattaa lämmöntuotannon joustavuutta, vähentää päästöjä ja sillä voidaan saavuttaa kustannustehokkuutta lämmöntuotannossa. Lisäksi sähkökattilan käytön ajoittuessa edullisille tunneille se myös laskee turbiinin sähkötehoa, kun sähkön tuottaminen ei ole kannattavaa. Sähkön hintakehitystä on vaikea ennustaa, mutta lisääntyvän tuuli- ja aurinkovoimatuotannon perusteella voisi olettaa, että sähkökattilalle suotuisia hintoja olisi tarjolla tulevaisuudessa. Puupolttoaineiden hintatrendi on ollut nouseva ja mikäli hinnat jatkavat nousuaan, sähkökattilan kilpailukyky paranee. Turbiinin sähkötehon laskeminen alhaisilla sähkön hinnoilla laskee sähkökattilan potentiaalia, mutta kyseisellä ajotavalla saavutettava kokonaishyöty on suurempi verrattuna pelkkään turbiinin sähkötehon laskemiseen tai sähkökattilan käyttöön. Sähkökattilan käyttö kesällä muun kaukolämmön tuotannon korvaajana kasvattaa sähkökattilan potentiaalia. Lisäksi sähkökattilalla on mahdollista osallistua säätösähkömarkkinoille.

Kaukolämpöakun avulla sähköntuotantoa on mahdollista optimoida ajallisesti, joka kasvattaa sähköntuotannon joustavuutta ja kannattavuutta. Kaukolämpöakku on parhaimmillaan, kun sähkön hintavaihtelut vuorokauden aikana ovat suuria, jolloin sähköntuotantoa voidaan kasvattaa korkeilla sähkön hinnoilla ja vähentää matalilla sähkön hinnoilla. Matalilla sähkön hinnoilla kaukolämpöakulla ei ole kannattavaa lisätä sähköntuotantoa. Tulokset osoittavat, että kiinteällä lataus- ja purkujaksolla voidaan saavuttaa suuria taloudellisia hyötyjä. Sähkötehon kasvattamiseen apujäähdytyksellä verrattuna kaukolämpöakulla lämpö saadaan talteen ja voidaan käyttää myöhemmin, jolloin lämpöä ja polttoainetta ei mene hukkaan. Kaukolämpöakku kasvattaa myös CHP-laitoksen kykyä osallistua säätösähkömarkkinoille.

Puupolttoaineen kuivauksella on mahdollista saavuttaa suuria säästöjä, kun kuivatulla puupolttoaineella korvataan muuta polttoainehankintaa. Puupolttoaineen kuivaus kuluttaa paljon lämpöenergiaa, jonka seurauksena kannattavuus on vahvasti sidoksissa kuivauslämmön ja korvattavan polttoaineen hintaan. Puupolttoaineen kuivauksella voitaisiin korvata esimerkiksi turpeen käyttöä, mutta kannattavuutta ei liene aiheellista perustaa pelkästään turpeen korvaamiseen, sillä turpeesta tullaan luopumaan energiakäytössä joka tapauksessa. Mikäli laitosalueelta löytyy hyödynnettävä hukkalämpövirta ja puupolttoaineiden hinnat jatkavat kasvuaan, puupolttoaineen kuivaus voi olla erinomainen ratkaisu.

On syytä muistaa, että esimerkkilaskelmien tuloksia ei tule yleistää, sillä tulokset ovat erilaisia eri toimintaympäristöissä ja olosuhteissa. Jokin ratkaisu voi olla kannattava toisessa toimintaympäristössä, vaikka se ei olisi kannattava toisessa ja päinvastoin. Lisäksi laskelmat ovat alustavia ja yksinkertaistettuja ja niiden tarkoituksena on kartoittaa eri teknologioiden potentiaalia. Esimerkiksi investointipäätöksen tueksi vaadittaisiin yksityiskohtaisemmat laskelmat. Tämän työn tarkoituksena ei kuitenkaan ollut tehdä laitospohjaisia laskelmia.

Sähkökattilan ja kaukolämpöakun käyttöön CHP-laitoksen yhteydessä liittyy myös haasteita. Mallinnuksessa ei esimerkiksi otettu huomioon kattilan, turbiinin, sähkökattilan tai kaukolämpöakun tehonsäätönopeutta, vaan säätönopeuden oletettiin olevan riittävä. Tehonmuutokset ovat mallinnuksessa toisinaan suuria, jolloin säätönopeus voi tulla joissakin tapauksissa rajoitteeksi. CHP-laitoksen syklinen ajo, jota sähkökattila ja kaukolämpöakku lisäävät, kasvattaa todennäköisesti myös kunnossapidon tarvetta ja kustannuksia. Lisäksi laitteiden optimaalinen operointi voi tuottaa haasteita, eli milloin esimerkiksi sähkökattilaa ajetaan tai kaukolämpöakkua ladataan ja puretaan. Lisäksi mallinnus tehtiin tuntitasolla ja vartituseeseen siirtyminen vaatii laitteistoilta entistä nopeampaa säätökykyä.

Kuten todettu, sähkön ja polttoaineiden hintakehitys on epävarmaa. Sähkön hintakehityksen ennustetaan olevan laskusuuntainen, kun sähkömarkkinat alkavat hiljalleen toipua myllerryksestä. Sähkön suuri hintavolatiliteetti on kuitenkin luultavasti tullut pysyäkseen. Lisääntyvä tuuli- ja aurinkovoimatuotanto tulevat todennäköisesti tarjoamaan mahdollisuuksia sähkökattilalle ja kaukolämpökäyttöön. Sähkön hinnan vaikea ennustettavuus luo haasteita myös polttoainehankinnan suunnitteluun, sillä esimerkiksi turbiinin sähkötehon laskeminen sekä sähkökattilan käyttö vähentävät polttoaineen kulutusta. Puupolttoaineiden hintakehitys on ollut kasvusuuntainen ja kysynnän kasvaessa on mahdollista, että se jatkuu sellaisenaan.

Jatkotutkimukset voisivat keskittyä potentiaalisten teknologioiden yksityiskohtaisempaan mallintamiseen tietyssä laitosympäristössä. Tässä työssä mallinnettiin vain yhtä komponenttia kerrallaan CHP-laitoksen yhteydessä, mutta esimerkiksi sähkökattilan, kaukolämpökäyttöön ja CHP-laitoksen mallintaminen samassa toimintaympäristössä olisi mielenkiintoista. Sähkön varastointia CHP-laitoksen yhteydessä ei mallinnettu tässä työssä, joka olisi myös hyvä tutkimuskohde. Työssä kartoitettiin vasta teknologioiden potentiaalia, joten jatkotutkimuksissa voisi keskittyä syvemmin myös investointilaskentaan. Sähkökattilan ja kaukolämpökäyttöön hyödyntämisen mahdollisuus säätösähkömarkkinoilla tunnistettiin, mutta sitä ei tutkittu tarkemmin tässä työssä, joten myös se voisi olla mielekäs jatkotutkimuskohde.

Edellä mainittujen lisäksi olisi kiinnostavaa tutkia, voisiko puupolttoaineen kuivauksella vähentää apujäähdytyksen tarvetta. Keväällä ja syksyllä kattilan minimikuorman alittuessa apujäähdytyksen sijaan lämpöä voisi hyödyntää puupolttoaineen kuivauksessa. Lisäksi liksäsähkön tuottamisesta aiheutuva ylimääräinen lämpökuorma voitaisiin ohjata apujäähdyttimen sijaan kuivurille. Kyseinen lämpö ei ole edullisinta, mutta olisi tehokkaampaa käyttää lämpöä hyödyksi, kuin siirtää se vesistöön. Apujäähdytyksen käyttö on kuitenkin vain ajoittaista, joten kuivurille vaadittaisiin joka tapauksessa toinen ensisijainen lämmönlähde.

9 Yhteenveto

CHP-laitosten toimintaympäristö on muuttunut nopeasti viime vuosina. Sähkön keskimääräinen hinta on kasvanut, mutta toisaalta sähkö on ajoittain niin edullista, ettei sen tuottaminen CHP-laitoksessa ole kannattavaa. Sähkön hintavolatiliteetti on kasvanut ja siihen vaikuttavat esimerkiksi lisääntyvä tuuli- ja aurinkovoimatuotanto. Lisäksi kilpailu puupolttoaineista on kiristynyt, jonka seurauksena hinnat ovat nousseet. CHP-laitosten on sopeuduttava uuteen toimintaympäristöön, jotta niiden toiminta olisi kannattavaa myös tulevaisuudessa.

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia millaisia ratkaisuja power-to-heat teknologiat, energiavarastot ja puupolttoaineen kuivausteknologiat tarjoavat CHP-laitoksen säätökyvyn ja tehokkuuden kehittämiseen nyt ja lähitulevaisuudessa, sekä mikä on teknologioiden teknistaloudellinen potentiaali. Eri teknologioihin tutustuttiin työn kirjallisuusosassa, jonka lisäksi sähkökattilasta, kaukolämpöakusta ja kuoren kuivauksesta viirakuivurilla laadittiin esimerkkilaskennat potentiaalın kartoittamiseksi.

Suurin osa käsitellyistä teknologioista on kypsyyssasteeltaan kaupallisella tasolla, mutta jotkin vaativat vielä kehitystä. Sähkökattilat ja lämpöpumput ovat kypsää ja koeteltua tekniikkaa, vaikkakin lämpöpumpuilla saavutettava lämpötilataso vaatii vielä kehitystä. Lämpövarastoista tuntuvan lämmön varastot ovat kypsän teknologia ja soveltuvat tällä hetkellä parhaiten CHP-laitoksen yhteyteen. Sähkön varastointitekniologioista perinteiset akut ovat tois-taiseksi paras vaihtoehto sähkön varastointiin, mutta myös virtausakuissa on potentiaalia. Puupolttoaineen kuivaustekniologioista esimerkiksi viirakuivuri on energiatehokkuusmielessä hyvä vaihtoehto, koska se soveltuu matalille kuivauslämpötiloille ja hukkalämmöille.

Esimerkkilaskelmissa käsitellyt sähkökattila, kaukolämpöakku ja puupolttoaineen kuivaus viirakuivurilla ovat koeteltua kaupallisen tason teknologiaa. Oikeassa toimintaympäristössä kyseisillä teknologioilla on mahdollistaa saavuttaa suuria taloudellisia hyötyjä. Sähkökattilalla on mahdollista saavuttaa kustannustehokkuutta lämmöntuotannossa, kasvattaa lämmöntuotannon joustavuutta ja vähentää päästöjä. Kaukolämpöakulla voidaan optimoida sähköntuotanto ajallisesti, joka kasvattaa sähköntuotannon joustavuutta ja kannattavuutta. Kuoren kuivaus kesällä ei vaikuta kannattavalta, mutta ympäri vuoden toimiva kuivuri vaikuttaa potentiaaliselta. Tulokset ovat tapauskohtaisia, joten niitä ole syytä yleistää.

Lähteet

Adamson Keri-Marie, Walmsley Timothy Gordon, Carson James K., Chen Qun, Schlosser Florian, Kong Lana ja Cleland Donald John. High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167 (2022) 112798. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112798>

AFRY Management Consulting Oy. 2021. Metsähakkeen kysynnän kehitys ja riittävyys Suomessa. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle ja Huoltovarmuuskeskukselle. Saatavissa: https://afry.com/sites/default/files/2021-05/metsahakkeen_kysynnän_kehitys_ja_riittavyys_suomessa_loppuraportti.pdf

AFRY Management Consulting Oy. 2023. Kotimaisten polttoaineiden toimintaympäristö ja käyttöarviot 2028 saakka. Saatavissa: https://afry.com/sites/default/files/2023-02/kotimaisten_polttoaineiden_toimintaymparisto_ja_kayttoarviot_2028_saakka_loppuraportti_8.2.2023.pdf

Ahola Jero. 2022. Aurinkoenergia. Teoksessa: Hyppänen Timo et al. 2022. Kohti hiilineutraalia Suomea - LUT-yliopiston energiaselonteko. ISBN 978-952-335-830-0. Saatavissa: <https://www.lut.fi/sites/default/files/media/documents/LUT-yliopiston-Energiaselonteko-2022.pdf>

Aittomäki Antero (toim.) et al. 2012. Kylmäteknikka. 4. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry. 413 s. ISBN 978-951-96449-7-4.

Alakangas Eija, Hurskainen Markus, Laatikainen-Luntama Jaana ja Korhonen Jaana. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. ISBN 978-951-38-8419-2. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T258.pdf>

Alva Guruprasad, Lin Yaxue ja Fang Guiyin. 2018. An overview of thermal energy storage systems. *Energy* 144 (2018) 341–378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>

Amos Wade A. 1998. Report on Biomass Drying Technology. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory. Saatavissa: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>

Anttila Perttu, Nivala Vesa, Hirvelä Hannu, Laitila Juha ja Sikanen Lauri. 2021. Metsähakkeen riittävyys energiaturpeen korvaajana. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/53440649/Luke+++Mets%C3%A4hakkeen+riitt%C3%A4vyys+energiaturpeen+korvaajana.pdf/92468c82-b919-a4b6-b47f-6101da02a3b3/Luke+++Mets%C3%A4hakkeen+riitt%C3%A4vyys+energiaturpeen+korvaajana.pdf?t=1620822223436>

Argyrou Maria C., Christodoulides Paul ja Kalogirou Soteris A. 2018. Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid scale applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 804–821. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.044>

Arpagaus Cordin, Bless Frédéric, Uhlmann Michael, Schiffmann Jürg ja Bertsch Stefan S. 2018. High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* 152 (2018) 985–1010. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>

Basu Prabir. 2015. Circulating Fluidized Bed Boiler - Design, Operation and Maintenance. Cham: Springer International Publishing. E-kirja. 366 s. ISBN 978-3-319-06173-3 (eBook).

BloombergNEF. 2022a. Global Energy Storage Market to Grow 15-Fold by 2030. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 12.10.2022]. [Viitattu 13.1.2023]. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030/>

BloombergNEF. 2022b. Lithium-ion Battery Pack Price Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 6.12.2022]. [Viitattu 26.1.2023]. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>

Bruno Frank, Belusko Martin, Liu Ming ja Tay N.H. Steven. 2021. Solid-liquid phase change materials for thermal energy storage. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. *Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications*. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Cabeza Luisa F. 2021. Advances in thermal energy storage systems: methods and applications. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Cabeza Luisa F., Fernández Inés ja Barreneche Camila. 2021. Introduction to thermal energy storage systems. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Calefa Oy. 2023. HotLevel-kuumalämpöpumppu. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.3.2023]. Saatavissa: <https://www.calefa.fi/hotlevel/>

Chen Guohua, Yue Po Lock ja Mujumdar Arun S. 2015. Dewatering and Drying of Wastewater Treatment Sludge. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. Handbook of Industrial Drying. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.

Cot-Gores Jaume, Castell Albert ja Cabeza Luisa F. 2012. Thermochemical energy storage and conversion: A state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5207–5224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.007>

Danish Energy Agency. 2016. Technology Data - Generation of Electricity and District heating. Versio 0013. [Julkaistu 8/2016]. [Päivitetty 2/2023]. [Viitattu 31.3.2023]. Saatavissa: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-generation-electricity-and>

Danish Energy Agency. 2020. Technology Data for Industrial Process Heat. Datasheet for industrial process heat. [Julkaistu 4/2020]. [Päivitetty 12/2022]. [Viitattu 20.12.2022]. Saatavissa: <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-industrial-process-heat>

Darrow Ken, Tidball Rick, Wang James ja Hampson Anne. 2017. Catalog of CHP Technologies. U.S. Environmental Protection Agency. Saatavissa: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies.pdf

de Haan André ja Bosch Hans. 2013. *Industrial Separation Processes: Fundamentals*. Berlin, Boston: De Gruyter. E-kirja. 384 s. e-ISBN 978-3-11-030672-9.

Devahastin Sakamon ja Mujumdar Arun S. 2015. *Indirect dryers*. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. *Handbook of Industrial Drying*. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.

Dincer Ibrahim ja Ezan Mehmet Akif. 2018. *Heat Storage: A Unique Solution For Energy Systems*. Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing. E-kirja. 334 s. ISBN 978-3-319-91893-8.

EDUCOGEN. 2001. *The European Educational Tool on Cogeneration*. Second Edition. Saatavissa: https://www.academia.edu/35089944/The_European_Educational_Tool_on_Cogeneration

Elstor Oy. 2023. Tuote ja palvelu. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.1.2023]. Saatavissa: <https://elstor.fi/tuote-palvelu/>

EPV Energia Oy. 2023. Lämmön sähköistyminen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.5.2023]. Saatavissa: <https://www.epv.fi/project/lammon-sahkoistyminen/>

Fagernäs L., Brammer J., Wilén C., Lauer M., ja Verhoeff F. 2010. Drying of biomass for second generation synfuel production. *Biomass and Bioenergy* 34 (2010) 1267–1277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.005>

Fallahi Ali, Guldentops Gert, Tao Mingjiang, Granados-Focil Sergio ja Van Dessel Steven. 2017. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Applied Thermal Engineering* 127 (2017) 1427–1441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161>

Fingrid Oyj. 2022a. Johdanto sähkömarkkinoihin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.1.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat>

Fingrid Oyj. 2022b. Reservimarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.1.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>

Fingrid Oyj. 2022c. Tuulivoimabuumi haastaa kantaverkon siirtokykyä länsirannikolla. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 12.7.2022]. [Viitattu 20.1.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2022/tuulivoimabuumi-haastaa-kantaverkon-siirtokyky-lansirannikolla/>

Fingrid Oyj. 2023. Aurinkovoima. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.5.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/aurinkovoima/>

Frazzica Andrea, Brancato Vincenza ja Palomba Valeria. 2021. Sorption systems for thermal energy storage. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. *Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications*. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Friotherm AG. 2023. Unitop. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2023]. Saatavissa: <https://www.friotherm.com/products/unitop/>

Gallo A.B., Simões-Moreira J.R., Costa H.K.M., Santos M.M. ja Moutinho dos Santos E. 2016. Energy storage in the energy transition context: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (2016) 800–822. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>

Grönman Aki, Inkeri Eero, Zhaurova Mariia, Luoranen Mika, Tynjälä Tero, Turunen-Saaresti Teemu, Breyer Christian, Bogdanov Dmitri, Satymov Rasul ja Pulkkinen Sirpa. 2022. Etelä-Karjalan energiavarastoinnin tiekartta. Lappeenrannan-Lahden Teknillinen Yliopisto LUT. ISBN 978-952-335-912-3. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-912-3>

Haikonen Turo. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. [Diplomityö]. Helsinki: Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/7939/Tutkimus_biopolttoaineiden_aumakuivauksesta.pdf

Havu Ari. 2023. Puupolttoaineen kuivaus. Valmet Technologies Oy. Product Portfolio Manager, Wood handling technology. [Sähköpostikeskustelu 21.4.2023].

Helen Oy. 2022. Vuosaaren biolämpölaitos on aloittanut lämmöntuotannon - muunneltava hybridilaitos tarjoaa huippuluokan energiatehokkuutta. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 20.12.2022]. [Viitattu 14.3.2023]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/uutiset/2022/vuosaaren-biolampolaitos-on-aloittanut-lammontuotannon-muunneltava-hybridilaitos-tarjoaa-huippuluokan-energiatehokkuutta>

Holmberg Henrik. 2007. Biofuel drying as a concept to improve the energy efficiency of an industrial CHP plant. Väitöskirja. Espoo: Otamedia Oy. 63 s. ISBN 978-951-22-8649-2. Saatavissa: <http://urn.fi/urn:nbn:fi:tkk-009027>

Holmberg Henrik. 2020. Teoksessa: Holmberg Henrik ja Ramm-Schmidt Leif. 2020. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1193428/mod_resource/content/1/EEN-E3003%2C%20moniste%202020.pdf

Huhtinen Markku, Kettunen Arto, Nurminen Pasi ja Pakkanen Heikki. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Helsinki: Edita. 379 s. ISBN 951-37-3360-2.

Huhtinen Markku, Korhonen Risto, Pimiä Tuomo ja Urpalainen Samu. 2013. Voimalaitostekniikka. 4. painos. Helsinki: Opetushallitus. 344 s. ISBN 978-952-13-5426-7.

Hukka Antti. 1996. Puun kuivumisen matemaattinen mallintaminen korkeissa lämpötiloissa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT julkaisuja 815. ISBN 951-38-4524-9. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/julkaisut/1996/J815.pdf>

Hyppänen Timo ja Raiko Risto. 2002. Leijupoltto. Teoksessa: Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko ja Kurki-Suonio Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Hyvinkään Lämpövoima Oy. 2022. Hyvinkään Lämpövoima alkaa varastoida ensimmäisenä Suomessa lämpöenergiaa mittavasti suureen hiekkakuoppaan - säästöt energian hinnassa vuodessa miljoonaluokkaa. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 31.8.2022]. [Viitattu 16.1.2023]. Saatavissa: <https://hlv.fi/ajankohtaista/lampovoima-alkaa-varastoida-lampoenergiaa-suureen-hiekkakuoppaan/>

IEA. 2022a. Energy Storage Technology Collaboration Programme. Thermal Energy Storage. Fact Sheets. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.1.2023]. Saatavissa: <https://iea-es.org/thermal-energy-storage/>

IEA. 2022b. ETP Clean Energy Technology Guide. [Verkkoaineisto]. [Päivitetty 21.9.2022]. [Viitattu 19.1.2023]. Saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>

IEA. 2022c. Technology Collaboration Programme. Annex 58: High-Temperature Heat Pumps. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.12.2022]. Saatavissa: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>

IRENA. 2020. Innovation Outlook: Thermal Energy Storage. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. ISBN 978-92-9260-279-6. Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf?rev=6950b7b9792344b5ab28d58e18209926

Kebede Abraham Alem, Kalogiannis Theodoros, Mierlo Joeri Van ja Berecibar Maitane. 2022. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy source grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159 (2022) 112213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>

Koohi-Fayegh S. ja Rosen M. A. 2020. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage* 27 (2020) 101047. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>

Kosmadakis George. 2019. Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. *Applied Thermal Engineering* 156 (2019) 287–298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082>

Krokida Magdalini, Marinos-Kouris Dimitris ja Mujumdar Arun S. 2015. Rotary Drying. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. Handbook of Industrial Drying. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.

Laing-Nepustil Doerte ja Zunft Stefan. 2021. Using concrete and other solid storage media in thermal energy storage systems. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Lampinen Markku J. 2006. Termodynamiikan perusteet. 4. korjattu painos. Helsinki: Ota-tieto. 182 s. ISBN 951-672-324-1.

Lappeenrannan Energia Oy. 2021. Uusiutuvaa sähköä käyttävä lämpöakku vähentää CO₂-päästöjä. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 23.6.2021]. [Viitattu 17.1.2023]. Saatavissa: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/ajankohtaista/uusiutuvaa-sahkoa-kayttava-lampoakku-vahentaa-co2-paastoja>

Levy Avi ja Borde Irene. 2015. Pneumatic and Flash Drying. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. Handbook of Industrial Drying. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.

Linder Marc. 2021. Using thermochemical reactions in thermal energy storage systems. Teoksessa: Cabeza Luisa F. 2021. Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications. 2nd edition. London: Elsevier. E-kirja. 799 s. ISBN 978-0-12-819888-9.

Lohiniva Elina, Mäkinen Tuula ja Sipilä Kai. 2001. Lietteiden käsittely. Uudet ja käytössä olevat tekniikat. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT Tiedotteita 2081. 146 s. ISBN 951-38-5796-4. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2001/T2081.pdf>

Luo Xing, Wang Jihong, Dooner Mark ja Clarke Jonathan. 2015. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* 137 (2015) 511–536. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

Luonnonvarakeskus. 2022. Puun energiakäyttö 2021. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 17.11.2022]. [Viitattu 30.3.2023]. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/puunkaytto/puun-energiakaytto-2021>

Maaskola Ilkka ja Kataikko Matti. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Lämpöpumppu- ja ORC-sovellukset. Helsinki: Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10217/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Lampopumppu_ja_ORC-sovellukset.pdf

Maruf Md. Nasimul Islam, Morales-Espana Germán, Sijm Jos, Helistö Niina ja Kiviluoma Juha. 2022. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 53 (2022) 102553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>

Moilanen Antero, Nieminen Matti ja Alén Raimo. 2002. Polttoaineiden ominaisuudet ja luokittelu. Teoksessa: Raiko Risto, Saastamoinen Jaakko, Hupa Mikko ja Kurki-Suonio Ilmari. 2002. Poltto ja palaminen. 2. täydennetty painos. International Flame Research Foundation - Suomen kansallinen osasto. 750 s. ISBN 951-666-604-3.

Mowla D., Tran H.N. ja Grant Allen D. 2013. A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes. *Biomass and Bioenergy* 58 (2013) 365–378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.09.002>

Mujumdar Arun S. 2015. Principles, Classification, and Selection of Dryers. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. Handbook of Industrial Drying. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.

Myllymaa Tiina. 2019. Upgrading of waste streams into fuel by means of drying with low temperature excess heat - a techno-economic evaluation. Väitöskirja. Espoo: Aalto yliopisto. Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 215/2019. ISBN 978-952-60-8834-1. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8834-1>

Nazir Hassan, Batool Mariah, Osorio Francisco J. Bolivar, Isaza-Ruiz Marlory, Xu Xinhai, Vignarooban K., Phelan Patrick, Inamuddin ja Kannan Arunachala M. 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 129 (2019) 491–523. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126>

Nord Pool. 2023. Day-ahead prices. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.4.2023]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=table>

Nummelin Jaakko, Hankalin Ville ja Raiko Markku. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Polttoaineen kuivaustekniikat. Helsinki: Motiva. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10215/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Polttoaineen_kuivatustekniikat.pdf

Oilon Group Oy. 2023. Teollisuuslämpöpumput. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.5.2023]. Saatavissa: <https://oilon.com/fi/tuotteet/teollisuuslampopumput/>

PARAT Halvorsen AS. 2022. PARAT IEH, PARAT IEL. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.12.2022]. Saatavissa: <https://www.parat.no/fi/>

PARAT Halvorsen AS. 2023. Uutiset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.5.2023]. Saatavissa: <https://www.parat.no/fi/uutiset/>

- Pardo P., Deydier A., Anxionnaz-Minvielle Z., Rougé S. Cabassud M. ja Cognet P. 2014. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014) 591–610. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.014>
- Pohjolan Voima Oyj. 2022. Tietoa meistä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.12.2022]. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/tietoa-meista/>
- Pohjolan Voima Oyj. 2023a. Energiantuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.3.2023]. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/tuotamme-sahkoa-ja-lampoa/>
- Pohjolan Voima Oyj. 2023b. Lämpövoimalaitoksemme. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.4.2023]. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/tuotamme-sahkoa-ja-lampoa/lampovoima/lampovoimalaitoksemme/>
- Poirier Dan. 2015. Conveyor Dryers. Teoksessa: Mujumdar Arun S. (toim.). 2015. Handbook of Industrial Drying. 4. painos. Boca Raton, Florida: CRC Press. E-kirja. 1301 s. ISBN 978-1-4665-9666-5.
- Polar Night Energy. 2023. Technology. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.1.2023]. Saatavissa: <https://polarnightenergy.fi/technology>
- Raitila Jyrki, Tsupari Eemeli ja Hurskainen Markus. 2018. Lähienergialla omavaraisuuteen: polttoaineen kosteuden vaikutus hakekattilan toimintaan ja hakkeen aurinkokuivaus. Jyväskylä: VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti Nro VTT-CR-00413-18. Saatavissa: https://cris.vtt.fi/files/52565139/VTT_CR_00413_18.pdf
- Rondo Energy. 2023. The Rondo Heat Battery. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.1.2023]. Saatavissa: <https://rondo.com/how-it-works>
- Roos Carolyn J. 2008. Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. U.S. Department of Energy. Saatavissa: <http://northwestchptap.org/nwchpdocs/biomassdryinganddewateringforcleanheatandpower.pdf>
- Schuer Dietmar ja Schneider Clements. 2018. Electrification of industrial process heat: long term applications, potentials and impacts. Saatavissa: https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Industrial_Summer_Study/2018/4-technology-products-and-system-optimisation/electrification-of-industrial-process-heat-long-term-applications-potentials-and-impacts/

Stadler Ingo, Riegel Bernhard, Ohms Detlef, Cattaneo Eduardo, Langer Götz ja Herrmann Matthias. 2019a. Electrochemical Energy Storage Systems. Teoksessa: Sterner Michael ja Stadler Ingo. 2019. Handbook of Energy Storage. Demand, Technologies, Integration. Translation of 2nd German edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. E-kirja. 821 s. ISBN 978-3-662-55504-0 (eBook).

Stadler Ingo, Hauer Andreas ja Bauer Thomas. 2019b. Thermal Energy Storage. Teoksessa: Sterner Michael ja Stadler Ingo. 2019. Handbook of Energy Storage. Demand, Technologies, Integration. Translation of 2nd German edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. E-kirja. 821 s. ISBN 978-3-662-55504-0 (eBook).

Sterner Michael ja Bauer Franz. 2019. Definition and Classification of Energy Storage Systems. Teoksessa: Sterner Michael ja Stadler Ingo. 2019. Handbook of Energy Storage. Demand, Technologies, Integration. Translation of 2nd German edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. E-kirja. 821 s. ISBN 978-3-662-55504-0 (eBook).

Sterner Michael ja Thema Martin. 2019. Comparison of Storage Systems. Teoksessa: Sterner Michael ja Stadler Ingo. 2019. Handbook of Energy Storage. Demand, Technologies, Integration. Translation of 2nd German edition. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. E-kirja. 821 s. ISBN 978-3-662-55504-0 (eBook).

Suomen Tuulivoimayhdistys ry. 2023. Tuulivoimalat Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.2.2023]. Saatavissa: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa>

Suomen virallinen tilasto. 2022. Sähkön ja lämmön tuotanto. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1798-5072. [Viitattu 28.11.2022]. Saatavissa: <https://stat.fi/tilasto/salatu>

Suomen virallinen tilasto. 2023. Energian hinnat. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Tilastokeskus. ISSN=1779-7984. [Viitattu 25.4.2023]. Saatavissa: <https://stat.fi/tilasto/ehi>

Swiss Combi. 2023. Compact Belt Dryer KBT. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.4.2023]. Saatavissa: <https://www.swisscombi.ch/en/dryers/KBT.html>

Tampereen Sähkölaitos Oy. 2022. Tiedote: Yksi Suomen ensimmäisistä sähkökäyttöisistä lämpökattiloista on saapunut Tampereelle. [Verkkoaineisto]. [Julkaistu 13.12.2022]. [Viitattu 19.5.2023]. Saatavissa: <https://www.sahkolaitos.fi/blogiarkisto/yksi-suomen-ensimmaisista-sahkokayttoisista-lampokattiloista-on-saapunut-tampereelle/>

Tampereen Sähkölaitos Oy. 2023. Uusi laitos. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2023]. Saatavissa: <https://naistenlahti.fi/uusi-laitos/>

Teir Sebastian. 2003. The Basics of Steam Generation. Teoksessa: Teir Sebastian. 2003. Steam Boiler Technology. 2. painos. Espoo: Helsinki University of Technology. 216 s. ISBN 951-22-6759-4.

U.S. Department of Energy. 2021. Global Energy Storage Database. Statistics. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.1.2023]. Saatavissa: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>

Vakkilainen Esa. 2016. Steam Generation From Biomass - Construction and Design of Large Boilers. Oxford: Elsevier Science & Technology. E-kirja. 298 s. EISBN 9780128044070.

Vakkilainen Esa ja Hyppänen Timo. 2022. Näkemyksiä energijärjestelmän tulevaisuudesta. Teoksessa: Hyppänen Timo et al. 2022. Kohti hiilineutraalia Suomea - LUT-yliopiston energiaselonteko. ISBN 978-952-335-830-0. Saatavissa: <https://www.lut.fi/sites/default/files/media/documents/LUT-yliopiston-Energiaselonteko-2022.pdf>

Wikstén Ralf. 1998. Lämpövoimaprocessit. 2. muuttumaton painos. Espoo: Otatieto. 164 s. ISBN 951-672-230-X.

World Energy Council. 2016. World Energy Recourses. E-storage: Shifting from cost to value. Wind and solar applications. Saatavissa: <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Resources-E-storage-report-2016.02.04.pdf>

Zhang Dianjun ja Teir Sebastian. 2003. Circulating Fluidized Bed Boilers. Teoksessa: Teir Sebastian. 2003. Steam Boiler Technology. 2. painos. Espoo: Helsinki University of Technology. 216 s. ISBN 951-22-6759-4.

Zhang Ziyu, Ding Tao, Zhou Quan, Sun Yuge, Qu Ming, Zeng Ziuy, Ju Yuanto, Li Li, Wang Kang ja Chi Fangde. 2021. A review of technologies and applications on versatile energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148 (2021) 111263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111263>

Liitteet

Liite 1. Lämmön varastomateriaalien ominaisuuksia

Taulukko 1. Eräiden tuntuvan lämmön varastomateriaalien lämpötila-alue, tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja volumetrinen lämpökapasiteetti (mukaillen Stadler et al. 2019b, 575).

Materiaali	Lämpötila-alue [°C]	Tiheys [kg/m ³]	Ominaislämpö- kapasiteetti [kJ/kgK]	Volumetrinen lämpö- kapasiteetti [kJ/m ³ K]
Vesi (paineistamaton)	0–100	998	4,19	4175
Terminen öljy	0–400	850–900	1,6–2,1	1360–1620
Sulasuolat	150–450	2243–2561	1,3	1725–1970
Natrium	100–800	975–1203	1,3	750–925
Betoni	0–500	1900–2300	0,88	1672–2074
Hiekka, sora, kivi	0–800	1800–2000	0,71	1278–1420
Graniitti	0–800	2750	0,75	2062
Rauta	0–800	7860	0,47	3655
Tiili	0–1000	1400–1900	0,84	1176–1596
Sora-vesi	0–100	2200	1,32	2904

Taulukko 2. Tuntuvan lämmön varastojen ominaisuuksia, kun varastointimateriaalina on vesi, kiinteä materiaali tai sulasuola (IEA 2022a; IRENA 2020, 69).

Materiaali	Vesi (säiliö)	Kiinteät	Sulasuolat
Energiatiheys [kWh/m ³]	15–100	70–150	70–200
[kWh/t]	60–100	50–100	40–110
Tehotiheys [kW/m ³]	30–500	20–40	-
[kW/t]	30–500	15–25	-
Varastoinnin kesto	Tunteja-kuukausia	Tunteja-kuukausia	Tunteja-päiviä
Hyötysuhde [%]	50–90	98	95–99
Tekninen käyttöikä [vuotta]	15–40	> 20	> 20
[sykliä]	20–4 000	> 10 000	> 10 000
Itsepurkautuminen [%/vrk]	0,5–2,5	2–4	1
Tehoalue	kW-10 MW	kW-100 MW	0,1–300 MW
Kapasiteetti	kWh-1 GWh	10 kWh-GWh	MWh-5 GWh
Investointikustannus [€/kW]	1–15	100–150	-
[€/kWh]	0,4–10	15–40	20–70
Vasteaika	Minuutteja	Minuutteja	Minuutteja
Lämpötila-alue [°C]	< 100	< 1300	170–565
Kypsyysaste (1–9)	9	6–7	4–9

Taulukko 3. Matalan ja korkean lämpötilan faasimuutosmateriaalien ominaisuuksia (IEA 2022a; IRENA 2020, 69).

Faasimuutosmateriaali	Matala lämpötila	Korkea lämpötila
Energiatiheys [kWh/m ³] [kWh/t]	56–110 40–110	30–96 49
Tehotiheys [kW/m ³] [kW/t]	10–20 5–15	15–80 7,5–41
Varastoinnin kesto	Tunteja-viikkoja	Tunteja-päiviä
Hyötysuhde [%]	80–98	98
Tekninen käyttöikä [vuotta] [sykliä]	- 300–10 000	- 5 000–10 000
Itsepurkautuminen [%/vrk]	< 15	0,5–2,5
Teho [MW]	kW–10 kW	10 kW–100 MW
Kapasiteetti	kWh–100 kWh	10 kWh–GWh
Investointikustannus [€/kW] [€/kWh]	200–400 20–100	50–100 40–80
Vasteaika	Minutteja	Minutteja
Lämpötila-alue [°C]	< 120	< 1000
Kypsyysaste (1–9)	4–9	7

Liite 2. Akkujen ja virtausakkujen ominaisuuksia

Taulukko 1. Perinteisten akkujen ominaisuuksia (Argyrou et al. 2018, 816; Luo et al. 2015, 526; Zhang et al. 2021, 23).

Akkutyyppi	Litiumioni	Lyijyhappo	Natrium	Nikkeli
Energiatiheys [Wh/kg]	75–200	25–45	85–240	50–80
Teho [MW]	0,1–100	0–40	0,15–34	0–40
Kapasiteetti [MWh]	< 10	40	245	7
Itsepurkautuminen [%/vrk]	0,1–0,3	0,1–0,3	0,05	0,03–1,2
Tekninen käyttöikä [vuotta] [sykliä]	5–15 1 000–20 000	5–15 200–1 800	10–20 2 500–4 500	10–20 500–3 500
Hyötysuhde [%]	75–99	65–90	75–90	60–83
Vasteaika	Millisekunteja	Millisekunteja	Millisekunteja	Millisekunteja

Taulukko 2. Virtausakkujen ominaisuuksia (Argyrou et al. 2018, 816; Luo et al. 2015, 526; Zhang et al. 2021, 23).

Virtausakun tyyppi	Vanadiini redox	Sinkkibromi	Polysulfidibromi
Energiatiheys [Wh/kg]	10–50	30–85	15–30
Teho [MW]	0,3–50	0,05–10	0,1–15
Kapasiteetti [MWh]	60	4	120
Itsepurkautuminen [%/vrk]	0,15	Lähes 0	Lähes 0
Tekninen käyttöikä [vuotta] [sykliä]	5–20 12 000–14 000	5–20 1 500–10 000	10–15 2 000
Hyötysuhde [%]	65–85	65–80	60–75
Vasteaika	Millisekunteja	Millisekunteja	Millisekunteja

Liite 3. Puupolttoaineen kuivausteknologioiden ominaisuuksia

Taulukko 1. Puupolttoaineen kuivausteknologioiden ominaisuuksia (Fagernäs et al. 2010, 1274; Holmberg 2007, 10; Nummelin et al. 2014, 20).

Kuivurityyppi	Viirakuivuri	Rumpukuivuri	Kaskadi- kuivuri	Pneumaattinen kuivuri	Kiintopeti- kuivurit
Kuivauskaasu	Ilma, savu- kaasu	Ilma, savu- kaasu, höyry	Savukaasu	Savukaasu, höyry	Ilma
Kuivauslämpötila [°C]	30–150	200–600	160–280	150–700	30–80
Loppukosteus [%]	> 5	2–10	10–15	10–20	20–30
Haihdutuskapasi- teetti [tH ₂ O/h]	0,5–40	5–75	0,8–7	10–30	0,1–20
Lämmönkulutus [MJ/kgH ₂ O]	4–6	3,5–5	5,8	0,4–3,7	-

Liite 4. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset

Taulukko 1. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset vuosien 2018 ja 2019 sähkön hintaprofiileilla, kun CHP-laitos on käynnissä.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2018			2019			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	5,5	4,1	2,7	5,6	4,2	2,8	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	280	279	277	276	275	273	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1361	1360	1357	1357	1355	1352	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,7	6,9	8,2	9,6	M€
Sähkön myynnin voitto	5,5	4,1	2,7	5,7	4,4	3,0	M€
Hyöty	31	51	91	96	139	197	k€
Turbiinin sähkötehon laske. + sähkökattila							
CHP lämpöenergia	780	779	768	775	773	769	GWh
CHP sähköenergia	280	278	273	276	274	272	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1358	1355	1335	1348	1343	1334	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,4	26,9	19,4	23,2	26,9	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,6	6,9	8,2	9,5	M€
Sähkön myynnin voitto	5,5	4,1	2,8	5,7	4,4	3,0	M€
Sähkökattila lämpöenergia	2,0	3,3	13,8	6,5	8,6	12,9	GWh
Sähkökattilan osuus lämmöntarpeesta	0,2	0,4	1,8	0,8	1,1	1,6	%
Sähkökattilan ajotunnit	89	131	370	214	279	407	h
Sähkökattilan keskimääräinen teho	21,9	24,9	37,2	30,4	30,8	31,6	MW
Sähkökattilan lämmöntuotannon kustannukset	0,0	0,1	0,4	0,1	0,2	0,3	M€
Lämmöntuotannon kustannukset yhteensä	19,5	23,4	27,3	19,5	23,4	27,2	M€
Hyöty	20	34	91	75	113	169	k€
Hyöty yhteensä	52	85	182	171	252	366	k€
Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset							
CHP	25,0	30,0	35,0	25,0	30,0	35,0	€/MWh
Sähkökattilan keskimääräinen	15,7	20,7	30,4	14,0	17,5	22,7	€/MWh
CHP + sähkökattila	25,0	30,0	34,9	24,9	29,9	34,8	€/MWh
Sähkökattilaa ajetaan, kun SPOT <	18,8	23,7	28,7	18,8	23,7	28,7	€/MWh

Taulukko 2. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset vuosien 2020 ja 2021 sähkön hintaprofiileilla, kun CHP-laitos on käynnissä.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2020			2021			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	0,5	-0,9	-2,4	13,0	11,6	10,2	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	217	189	164	270	258	243	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1281	1245	1213	1349	1333	1314	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,4	5,7	5,8	6,7	7,7	8,5	M€
Sähkön myynnin voitto	1,5	0,8	0,2	13,2	12,0	10,9	M€
Hyöty	1081	1743	2518	174	383	683	k€
Turbiinin sähkötehon laske. + sähkökattila							
CHP lämpöenergia	688	662	637	757	743	728	GWh
CHP sähköenergia	209	182	157	265	253	239	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1151	1082	1019	1310	1277	1240	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	17,2	19,9	22,3	18,9	22,3	25,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,2	5,5	5,5	6,6	7,6	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	1,6	0,9	0,2	13,2	12,0	10,9	M€
Sähkökattila lämpöenergia	93,5	120,2	144,7	25,5	39,3	53,9	GWh
Sähkökattilan osuus lämmöntarpeesta	12,0	15,4	18,5	3,3	5,0	6,9	%
Sähkökattilan ajotunnit	2400	3076	3675	659	1021	1360	h
Sähkökattilan keskimääräinen teho	39,0	39,1	39,4	38,6	38,5	39,7	MW
Sähkökattilan lämmöntuotannon kustannukset	1,5	2,3	3,1	0,5	0,9	1,4	M€
Lämmöntuotannon kustannukset yhteensä	18,8	22,1	25,4	19,4	23,2	26,8	M€
Hyöty	863	1388	2039	173	325	551	k€
Hyöty yhteensä	1944	3131	4557	347	708	1234	k€
Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset							
CHP	25,0	30,0	35,0	25,0	30,0	35,0	€/MWh
Sähkökattilan keskimääräinen	16,5	19,0	21,3	19,7	22,7	25,4	€/MWh
CHP + sähkökattila	24,0	28,3	32,5	24,8	29,6	34,3	€/MWh
Sähkökattilaa ajetaan, kun SPOT <	18,8	23,7	28,7	18,8	23,7	28,7	€/MWh

Taulukko 3. Sähkötötilan mallinnuksen tulokset vuoden 2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla, kun CHP-laitos on käynnissä.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2022			Keskimääräinen			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	29,5	28,1	26,7	10,8	9,4	8,0	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	262	251	244	281	279	272	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1338	1325	1316	1363	1361	1351	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	6,5	7,5	8,6	7,0	8,4	9,5	M€
Sähkön myynnin voitto	29,8	28,6	27,4	10,8	9,4	8,1	M€
Hyöty	301	532	767	5	27	129	k€
Turbiinin sähkötehon laske. + sähkötötila							
CHP lämpöenergia	752	744	738	780	773	759	GWh
CHP sähköenergia	258	249	243	281	277	267	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1295	1274	1257	1360	1346	1316	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	18,8	22,3	25,8	19,5	23,2	26,6	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	6,5	7,5	8,5	7,0	8,3	9,4	M€
Sähkön myynnin voitto	29,8	28,6	27,4	10,8	9,4	8,2	M€
Sähkötötila lämpöenergia	30,1	37,8	44,1	1,5	9,0	22,9	GWh
Sähkötötilan osuus lämmöntarpeesta	3,9	4,8	5,6	0,2	1,1	2,9	%
Sähkötötilan ajotunnit	753	935	1098	48	236	585	h
Sähkötötilan keskimääräinen teho	40,0	40,4	40,2	31,8	38,0	39,1	MW
Sähkötötilan lämmöntuotannon kustannukset	0,5	0,8	1,0	0,0	0,2	0,7	M€
Lämmöntuotannon kustannukset yhteensä	19,3	23,1	26,8	19,5	23,4	27,3	M€
Hyöty	235	395	599	7	42	133	k€
Hyöty yhteensä	536	926	1366	11	68	261	k€
Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset							
CHP	25,0	30,0	35,0	25,0	30,0	35,0	€/MWh
Sähkötötilan keskimääräinen	18,1	20,0	21,7	22,5	27,4	30,8	€/MWh
CHP + sähkötötila	24,7	29,5	34,3	25,0	30,0	34,9	€/MWh
Sähkötötilaa ajetaan, kun SPOT <	18,8	23,7	28,7	18,8	23,7	28,7	€/MWh

Taulukko 4. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset vuosien 2018–2020 sähkön hintaprofiileilla, kun CHP-laitos ei ole käynnissä.

Sähkön hintaprofiili	2018	2019	2020	
Kaukolämmön tarve	39,4	39,4	39,4	GWh
Muu KL tuotanto	36,5	18,2	11,1	GWh
Sähkökattila lämpöenergia	2,9	21,2	28,3	GWh
Sähkökattilan osuus kaukolämmön tarpeesta	7,3	53,8	71,7	%
Sähkökattilan ajotunnit	143	1060	1413	h
Sähkökattilan lämmöntuotannon kustannukset	127	826	820	k€
Lämmöntuotannon kustannukset ilman sähkökattilaa	1970	1970	1970	k€
Lämmöntuotannon kustannukset sähkökattilan kanssa	1954	1736	1377	k€
Hyöty	16	234	593	k€
Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset				
Muu KL tuotanto	50,0	50,0	50,0	€/MWh
Sähkökattilan keskimääräinen	44,4	39,0	29,0	€/MWh
Muu KL tuotanto + sähkökattila	49,6	44,1	35,0	€/MWh
Sähkökattilaa ajetaan, kun SPOT <	43,5	43,5	43,5	€/MWh

Taulukko 5. Sähkökattilan mallinnuksen tulokset vuosien 2021, 2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla, kun CHP-laitos ei ole käynnissä.

Sähkön hintaprofiili	2021	2022	KM	
Kaukolämmön tarve	39,4	39,4	39,4	GWh
Muu KL tuotanto	34,1	31,7	32,6	GWh
Sähkökattila lämpöenergia	5,3	7,7	6,8	GWh
Sähkökattilan osuus kaukolämmön tarpeesta	13,4	19,6	17,2	%
Sähkökattilan ajotunnit	264	387	339	h
Sähkökattilan lämmöntuotannon kustannukset	197	161	267	k€
Lämmöntuotannon kustannukset ilman sähkökattilaa	1970	1970	1970	k€
Lämmöntuotannon kustannukset sähkökattilan kanssa	1903	1744	1898	k€
Hyöty	67	226	72	k€
Lämmöntuotannon muuttuvat kustannukset				
Muu KL tuotanto	50,0	50,0	50,0	€/MWh
Sähkökattilan keskimääräinen	37,3	20,8	39,3	€/MWh
Muu KL tuotanto + sähkökattila	48,3	44,3	48,2	€/MWh
Sähkökattilaa ajetaan, kun SPOT <	43,5	43,5	43,5	€/MWh

Liite 5. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset

Taulukko 1. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2018 ja 2019 sähkön hintaprofiileilla eri kapasiteeteilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2018			2019			
Kaukolämpöakun kapasiteetti	400	500	600	400	500	600	GWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	279	279	279	275	275	275	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1360	1360	1360	1355	1355	1355	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,2	8,2	8,2	M€
Sähkön myynnin voitto	4,1	4,1	4,1	4,4	4,4	4,4	M€
Hyöty	51	51	51	139	139	139	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	280	280	280	276	276	276	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1362	1362	1363	1357	1358	1358	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,3	8,3	8,3	M€
Sähkön myynnin voitto	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6	4,6	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	74,9	83,1	87,1	76,3	84,2	87,7	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	74,6	82,8	86,6	76,1	83,9	87,3	GWh
KL-akun lataustunnit	2182	2352	2426	2231	2395	2459	h
KL-akun purkutunnit	2589	2770	2847	2624	2797	2864	h
Keskimääräinen latausteho	34,3	35,3	35,9	34,2	35,2	35,7	MW
Keskimääräinen purkuteho	28,8	29,9	30,4	29,0	30,0	30,5	MW
Hyöty	251	268	266	245	262	263	k€
Hyöty yhteensä	303	319	317	384	401	402	k€

Taulukko 2. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2020 ja 2021 sähkön hintaprofiileilla eri kapasiteeteilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2020			2021			
Kaukolämpöakun kapasiteetti	400	500	600	400	500	600	GWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	-0,9	-0,9	-0,9	11,6	11,6	11,6	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	189	189	189	258	258	258	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1245	1245	1245	1333	1333	1333	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,7	5,7	5,7	7,7	7,7	7,7	M€
Sähkön myynnin voitto	0,8	0,8	0,8	12,0	12,0	12,0	M€
Hyöty	1743	1743	1743	383	383	383	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	197	198	198	262	263	263	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1256	1257	1257	1339	1340	1341	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,9	5,9	5,9	7,9	7,9	7,9	M€
Sähkön myynnin voitto	1,1	1,1	1,1	13,0	13,2	13,2	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	41,9	45,3	46,9	67,3	74,1	77,1	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	41,7	45,1	46,6	67,0	73,7	76,7	GWh
KL-akun lataustunnit	1220	1287	1313	1988	2127	2181	h
KL-akun purkutunnit	1912	1998	2040	2454	2606	2671	h
Keskimääräinen latausteho	34,3	35,2	35,7	33,8	34,8	35,3	MW
Keskimääräinen purkuteho	21,8	22,5	22,9	27,3	28,3	28,7	MW
Hyöty	273	297	301	1028	1170	1199	k€
Hyöty yhteensä	2016	2040	2044	1410	1553	1582	k€

Taulukko 3. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuoden 2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla eri kapasiteeteilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2022			Keskimääräinen			
Kaukolämpöakun kapasiteetti	400	500	600	400	500	600	GWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	28,1	28,1	28,1	9,4	9,4	9,4	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	251	251	251	279	279	279	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1325	1325	1325	1361	1361	1361	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,5	7,5	7,5	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	28,6	28,6	28,6	9,4	9,4	9,4	M€
Hyöty	532	532	532	27	27	27	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	782	782	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	254	255	255	280	280	280	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1329	1330	1330	1362	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,6	7,6	7,6	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	30,1	30,3	30,3	10,1	10,2	10,3	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	68,3	75,2	78,6	76,3	84,1	87,5	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	68,3	75,2	78,6	76,1	83,8	87,1	GWh
KL-akun lataustunnit	2003	2146	2208	2236	2396	2460	h
KL-akun purkutunnit	2445	2605	2672	2615	2787	2852	h
Keskimääräinen latausteho	34,1	35,0	35,6	34,1	35,1	35,6	MW
Keskimääräinen purkuteho	27,9	28,9	29,4	29,1	30,1	30,5	MW
Hyöty	1468	1649	1705	696	777	792	k€
Hyöty yhteensä	2000	2181	2236	723	804	819	k€

Taulukko 4. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2018 ja 2019 sähkön hintaprofiileilla eri lataus- ja purkutehoilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2018			2019			
Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho	40	50	60	40	50	60	MW
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	4,1	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	279	279	279	275	275	275	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1360	1360	1360	1355	1355	1355	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,2	8,2	8,2	M€
Sähkön myynnin voitto	4,1	4,1	4,1	4,4	4,4	4,4	M€
Hyöty	51	51	51	139	139	139	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	280	280	280	276	276	276	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1362	1362	1362	1358	1358	1358	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,3	8,3	8,3	M€
Sähkön myynnin voitto	4,4	4,4	4,4	4,6	4,6	4,6	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	81,0	83,1	83,3	81,8	84,2	84,4	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	80,6	82,8	83,0	81,5	83,9	84,1	GWh
KL-akun lataustunnit	2504	2352	2266	2544	2395	2311	h
KL-akun purkutunnit	3003	2770	2642	3026	2797	2663	h
Keskimääräinen latausteho	32,3	35,3	36,8	32,1	35,2	36,5	MW
Keskimääräinen purkuteho	26,9	29,9	31,4	26,9	30,0	31,6	MW
Hyöty	257	268	267	256	262	259	k€
Hyöty yhteensä	308	319	318	395	401	398	k€

Taulukko 5. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2020 ja 2021 sähkön hintaprofiileilla eri lataus- ja purkutehoilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2020			2021			
Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho	40	50	60	40	50	60	MW
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	-0,9	-0,9	-0,9	11,6	11,6	11,6	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	189	189	189	258	258	258	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1245	1245	1245	1333	1333	1333	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,7	5,7	5,7	7,7	7,7	7,7	M€
Sähkön myynnin voitto	0,8	0,8	0,8	12,0	12,0	12,0	M€
Hyöty	1743	1743	1743	383	383	383	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	197	198	198	263	263	263	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1257	1257	1257	1340	1340	1340	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,9	5,9	5,9	7,9	7,9	7,9	M€
Sähkön myynnin voitto	1,1	1,1	1,1	13,2	13,2	13,2	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	43,0	45,3	45,9	71,7	74,1	74,4	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	42,9	45,1	45,7	71,4	73,7	74,1	GWh
KL-akun lataustunnit	1345	1287	1242	2247	2127	2057	h
KL-akun purkutunnit	2056	1998	1954	2782	2606	2495	h
Keskimääräinen latausteho	32,0	35,2	37,0	31,9	34,8	36,2	MW
Keskimääräinen purkuteho	20,9	22,5	23,4	25,7	28,3	29,7	MW
Hyöty	278	297	298	1150	1170	1140	k€
Hyöty yhteensä	2022	2040	2041	1533	1553	1523	k€

Taulukko 6. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuoden 2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla eri lataus- ja purkutehoilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2022			Keskimääräinen			
Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho	40	50	60	40	50	60	MW
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	28,1	28,1	28,1	9,4	9,4	9,4	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	251	251	251	279	279	279	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1325	1325	1325	1361	1361	1361	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,5	7,5	7,5	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	28,6	28,6	28,6	9,4	9,4	9,4	M€
Hyöty	532	532	532	27	27	27	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	782	782	782	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	255	255	254	280	280	280	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1330	1330	1329	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	23,5	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,6	7,6	7,6	8,4	8,4	8,4	M€
Sähkön myynnin voitto	30,2	30,3	30,2	10,2	10,2	10,2	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	73,1	75,2	75,5	81,7	84,1	84,3	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	73,1	75,2	75,5	81,4	83,8	84,0	GWh
KL-akun lataustunnit	2276	2146	2073	2544	2396	2312	h
KL-akun purkutunnit	2804	2605	2487	3015	2787	2656	h
Keskimääräinen latausteho	32,1	35,0	36,4	32,1	35,1	36,4	MW
Keskimääräinen purkuteho	26,1	28,9	30,3	27,0	30,1	31,6	MW
Hyöty	1629	1649	1606	758	777	760	k€
Hyöty yhteensä	2161	2181	2138	784	804	787	k€

Taulukko 7. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2018 ja 2019 sähkön hintaprofiileilla erilaisilla CHP-laitoksen muuttuvilla kustannuksilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2018			2019			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	5,5	4,1	2,7	5,6	4,2	2,8	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	280	279	277	276	275	273	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1361	1360	1357	1357	1355	1352	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,7	6,9	8,2	9,6	M€
Sähkön myynnin voitto	5,5	4,1	2,7	5,7	4,4	3,0	M€
Hyöty	31	51	91	96	139	197	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	782	GWh
CHP sähköenergia	281	280	278	278	276	274	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1362	1360	1359	1358	1355	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,6	23,5	27,4	19,6	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,7	6,9	8,3	9,6	M€
Sähkön myynnin voitto	5,8	4,4	3,0	6,0	4,6	3,3	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	84,9	83,1	79,5	85,0	84,2	80,4	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	84,6	82,8	79,2	84,7	83,9	80,4	GWh
KL-akun lataustunnit	2417	2352	2211	2418	2395	2303	h
KL-akun purkutunnit	2810	2770	2689	2810	2797	2728	h
Keskimääräinen latausteho	35,1	35,3	36,0	35,2	35,2	34,9	MW
Keskimääräinen purkuteho	30,1	29,9	29,4	30,2	30,0	29,5	MW
Hyöty	274	268	256	275	262	263	k€
Hyöty yhteensä	306	319	347	371	401	460	k€

Taulukko 8. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuosien 2020 ja 2021 sähkön hintaprofiileilla erilaisilla CHP-laitoksen muuttuvilla kustannuksilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2020			2021			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	0,5	-0,9	-2,4	13,0	11,6	10,2	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	217	189	164	270	258	243	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1281	1245	1213	1349	1333	1314	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,4	5,7	5,8	6,7	7,7	8,5	M€
Sähkön myynnin voitto	1,5	0,8	0,2	13,2	12,0	10,9	M€
Hyöty	1081	1743	2518	174	383	683	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	783	783	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	223	198	173	272	263	250	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1290	1257	1226	1353	1340	1324	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,6	23,5	27,4	19,6	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	5,6	5,9	6,1	6,8	7,9	8,7	M€
Sähkön myynnin voitto	1,9	1,1	0,4	14,4	13,2	12,0	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	54,3	45,3	38,9	77,3	74,1	72,4	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	53,9	45,1	38,7	77,0	73,7	72,0	GWh
KL-akun lataustunnit	1562	1287	1077	2215	2127	2085	h
KL-akun purkutunnit	2180	1998	1847	2664	2606	2582	h
Keskimääräinen latausteho	34,7	35,2	36,1	34,9	34,8	34,7	MW
Keskimääräinen purkuteho	24,7	22,5	20,9	28,9	28,3	27,9	MW
Hyöty	378	297	228	1225	1170	1112	k€
Hyöty yhteensä	1459	2040	2745	1399	1553	1795	k€

Taulukko 9. Kaukolämpöakun mallinnuksen tulokset vuoden 2022 ja keskimääräisellä sähkön hintaprofiililla erilaisilla CHP-laitoksen muuttuvilla kustannuksilla.

Normaali vastapaineajo							
Sähkön hintaprofiili	2022			Keskimääräinen			
CHP muuttuvat kustannukset	25	30	35	25	30	35	€/MWh
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	282	282	282	282	282	282	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1363	1363	1363	1363	1363	1363	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	7,0	8,4	9,9	7,0	8,4	9,9	M€
Sähkön myynnin voitto	29,5	28,1	26,7	10,8	9,4	8,0	M€
Turbiinin sähkötehon laskeminen							
CHP lämpöenergia	782	782	782	782	782	782	GWh
CHP sähköenergia	262	251	244	281	279	272	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1338	1325	1316	1363	1361	1351	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,5	23,5	27,4	19,5	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	6,5	7,5	8,6	7,0	8,4	9,5	M€
Sähkön myynnin voitto	29,8	28,6	27,4	10,8	9,4	8,1	M€
Hyöty	301	532	767	5	27	129	k€
Turbiinin sähkötehon laskeminen + KL-akku							
CHP lämpöenergia	783	782	782	783	783	783	GWh
CHP sähköenergia	264	255	249	281	280	274	GWh
CHP polttoaineen kulutus	1342	1330	1322	1364	1363	1355	GWh
CHP lämmöntuotannon kustannukset	19,6	23,5	27,4	19,6	23,5	27,4	M€
CHP sähköntuotannon kustannukset	6,6	7,6	8,7	7,0	8,4	9,6	M€
Sähkön myynnin voitto	31,5	30,3	29,1	11,6	10,2	8,9	M€
KL-akkuun ladattu lämpöenergia	76,7	75,2	73,9	85,6	84,1	80,8	GWh
KL-akusta purettu lämpöenergia	76,7	75,2	73,9	85,2	83,8	80,5	GWh
KL-akun lataustunnit	2188	2146	2110	2430	2396	2315	h
KL-akun purkutunnit	2626	2605	2583	2812	2787	2744	h
Keskimääräinen latausteho	35,1	35,0	35,0	35,2	35,1	34,9	MW
Keskimääräinen purkuteho	29,2	28,9	28,6	30,3	30,1	29,3	MW
Hyöty	1672	1649	1618	790	777	739	k€
Hyöty yhteensä	1973	2181	2385	794	804	868	k€

Liite 6. Kuoren kuivauksen tulokset

Taulukko 1. Loppukosteuden vaikutus energiamäärän kasvuun.

Loppukosteus	40	45	50	%
Talvi	18,6	14,8	10,2	GWh
Kevät	15,9	11,7	6,7	GWh
Kesä	11,1	6,6	1,3	GWh
Syksy	14,3	10,6	6,2	GWh
Koko vuosi	60,0	43,8	24,3	GWh

Taulukko 2. Kuoren kuivauksen taloudellinen hyöty eri loppukosteuksilla ja kuivauslämmön hinnoilla. Korvattavan polttoaineen hinta 27 €/MWh.

Loppukosteus	40			45			50			%
Kuivauslämmön hinta	5	10	15	5	10	15	5	10	15	€/MWh
Talvi	210	-19	-248	153	-28	-210	85	-40	-164	k€
Kevät	212	41	-131	143	17	-109	61	-11	-82	k€
Kesä	130	27	-75	50	-11	-72	-13	-25	-36	k€
Syksy	166	12	-142	106	-8	-122	34	-33	-99	k€
Koko vuosi	718	61	-595	452	-30	-513	167	-108	-382	k€

Taulukko 3. Kuoren kuivauksen taloudellinen hyöty eri loppukosteuksilla ja korvattavan polttoaineen hinnoilla. Kuivauslämmön hinta 5 €/MWh.

Loppukosteus	40			45			50			%
Korvattavan polttoaineen hinta	20	40	60	20	40	60	20	40	60	€/MWh
Talvi	79	452	825	50	345	641	14	217	420	k€
Kevät	100	419	738	61	296	530	14	147	280	k€
Kesä	52	274	497	4	136	269	-22	3	29	k€
Syksy	66	352	639	32	244	457	-9	114	238	k€
Koko vuosi	297	1498	2698	146	1021	1897	-3	482	967	k€

Taulukko 4. Kuoren kuivauksen taloudellinen hyöty eri kuivauslämmön ja korvattavan polttoaineen hinnoilla. Loppukosteus 45 %.

Kuivauslämmön hinta	5			10			15			€/MWh
Korvattavan polttoaineen hinta	20	40	60	20	40	60	20	40	60	€/MWh
Talvi	50	345	641	-132	164	459	-313	-18	278	k€
Kevät	61	296	530	-65	170	404	-191	44	278	k€
Kesä	4	136	269	-58	75	208	-119	14	147	k€
Syksy	32	244	457	-83	130	342	-197	16	228	k€
Koko vuosi	146	1021	1897	-337	538	1414	-820	56	931	k€