# LÄMMÖN VARASTOINTIRATKAISUJEN KARTOITUS JA NIIDEN TEKNISTALOUDELLISET ARVIOT PORI ENERGIA OY:N KAUKO-LÄMPÖVERKOSSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Juho Hakala

Tarkastaja: Tutkijatohtori Eero Inkeri

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Juho Hakala

**Lämmön varastointiratkaisujen kartoitus ja niiden teknistaloudelliset arviot Pori Energia Oy:n kaukolämpöverkossa**

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

29 sivua, 10 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: Tutkijatohtori Eero Inkeri

Ohjaajat: Tutkijatohtori Eero Inkeri, diplomi-insinööri Merja Heliniemi

Avainsanat: Lämmön varastointi, lämpövarasto, kaukolämpöakku, tuntuva, latentti, termokemiallinen

Kandidaatintyön tavoitteena on esitellä erilaisia vaihtoehtoja lämmön varastoimiseksi ja kuinka ne soveltuvat lämmön lyhytaikaisvarastointiin. Työssä valitaan sopivin tekniikka kaukolämpöakulle ja mitoitetaan kaukolämpöakku Porin kaukolämmön runkoverkkoon. Soveltuvimmaksi lämmön varastointimenetelmäksi valitaan tuntuvan lämpöenergian varastointi eristettyyn terässäiliöön, joka täytetään vedellä. Kaukolämpöakun lämpökapasiteetiksi valitaan 400 MWh ja purku- ja lataustehoksi 30 MW. Tällöin kaukolämpöakun vesitilavuus on 10000 $m^3$. Kaukolämpöakku kytketään suoralla kytkennällä kaukolämpöverkkoon.

Työn laskentaosuudessa simuloidaan Excelissä kaukolämpöakun käyttöä vuoden 2021 datan mukaan. Excel-simuloinnilla selvitetään kaukolämpöakun mahdollisuuksia korvaamaan Puuvillan lämpölaitos ja vähentämään apukattilan käyttöä. Työssä arvioidaan kaukolämpöakun käytöllä saavutettavaa taloudellista säästöpotentiaalia, mikä syntyy lisääntyneestä sähköntuotannosta ja vähentyneestä varalämpölaitoksen ja apukattilan käytöstä. Sähkön hintana käytetään vuoden 2021 Nord Pool spot -sähköpörssin hintoja. Kaukolämpöakun käytöllä olisi voitu vähentää öljyn käyttöä 3353 MWh.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Juho Hakala

**Survey and techno-economic analysis of possibilities for heat storage for Pori Energia Oy**

Bachelor's thesis

2022

29 pages, 10 figures, 4 tables, 1 appendice

Examiner: Postdoctoral researcher (PhD) Eero Inkeri

Supervisors: Postdoctoral researcher (PhD) Eero Inkeri, Master of Science (Technology) Merja Heliniemi

Keywords: heat storage, heat accumulator, thermal energy storage, TTES, sensible, latent, thermo-chemical

My bachelor's thesis aims to present different options for storing heat and demonstrate suitability for short-term heat storage. In my thesis I select the most suitable technology for a district heating storage and lay out dimensions for a district heating battery into Pori's district heating frame network. The most appropriate method of storing heat is the storage of sensible thermal energy in an insulated steel tank filled with water. The district heating battery has a thermal capacity of 400 MWh and a discharge and charging capacity of 30 MW. In this case, the water volume of the district heating battery is 10000 $m^3$. It is directly connected to the district heating network.

A calculation part of my thesis simulates the use of a district heating battery according to 2021 data. An Excel simulation investigates the possibilities of a district heating battery to replace the Puuvilla's heat only boiler and reduce the use of the auxiliary boiler. I assess the economic savings potential due to use of the district heating battery. Savings are a result of increased electricity production and reduced use of the Puuvilla's heat only boiler and auxiliary boiler. The price of electricity is the Nord Pool Spot market prices for 2021. A district heating battery could reduce the use of light fuel oil by 3353 MWh.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

| | | |
|---|---|---|
| $c_p$ | ominaislämpökapasiteetti | [kJ/kgK] |
| $e$ | energiatiheys | [Wh/m$^3$K] |
| $H$ | investoinnin hankintakustannus | [€] |
| $i$ | laskentakorkokanta | [%] |
| $n$ | takaisinmaksuaika | [a] |
| $p$ | paine | [bar] |
| $P$ | teho | [W] |
| $Q$ | lämpöenergia | [J, W] |
| $q$ | vuosittainen tulo | [€] |
| $t$ | aika | [h, a] |
| $T$ | lämpötila | [ºC, K] |
| $V$ | tilavuus | [m$^3$] |

Kreikkalaiset

| | | |
|---|---|---|
| $\eta$ | hyötysuhde | [-] |
| $\theta$ | lämpöteho | [W] |
| $\rho$ | tiheys | [kg/m$^3$] |

Alaindeksit

| | |
|---|---|
| til | tilavuus |

Lyhenteet

| | |
|---|---|
| CHP | Combined heat and power (sähkön ja lämmön yhteistuotanto) |

**Sisällysluettelo**

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto ..... 6
2 Pori Energia Oy ..... 7
3 Lämpöenergian varastointi ..... 9
3.1 Suora kytkentä ..... 12
3.2 Epäsuora kytkentä ..... 13
4 Lämpövaraston mitoitus ..... 14
4.1 Lämpövaraston kustannukset ..... 18
4.2 Lämpövaraston käytöllä saavutettavat säästöt ..... 20
4.3 Lämpövaraston taloudellinen kannattavuus ..... 23
5 Johtopäätökset ..... 27
6 Yhteenveto ..... 29
Lähteet ..... 30
Liitteet

# 1 Johdanto

Energia-alan murros on vauhdittanut energiayhtiöitä etsimään ratkaisuja kohti ympäristöystävällisempää energiantuotantoa. Suomen valtiolla on tavoitteena olla hiilineutraali vuonna 2035, mutta useat energiayhtiöt ovat asettaneet tiukemman aikataulun hiilineutraalin energiantuotannon saavuttamiseksi. Kaukolämmöllä on suuri rooli Suomessa kiinteistöjen lämmityksessä ja sitä voidaankin pitää tärkeimpänä lämmitysmuotona, sillä noin puolet Suomen kiinteistöistä on liitettynä kaukolämpöön. Suomessa valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan sähkön- ja lämmön yhteistuotanto-, eli CHP-laitoksilla. (Motiva 2021.)

Päästöjen vähennyksen merkitys kasvaa jatkuvasti ja vuodesta 2010 on Suomessa kaukolämmön tuotannossa hukkalämpöjen hyödyntäminen yli kolminkertaistunut ja samassa ajassa ovat päästöt laskeneet noin 40 prosenttia tuotettua energiayksikköä kohden. Päästöoikeuksien hinnat ovat viimeisen viiden vuoden aikana olleet jyrkästi nousussa, mikä on lisännyt kilpailukykyä päästöttömästi tuotetulle kaukolämmölle. (Energiateollisuus 2022.)

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on kartoittaa erilaisia vaihtoehtoja lämmön varastoimiseksi ja kuinka ne soveltuvat käytettäväksi kaukolämpöverkossa. Työssä esitellään erilaisia lämmönvarastointimenetelmiä, sekä erilaisia kytkentätapoja kaukolämpövarastoille ja mitä hyötyjä niillä voidaan saavuttaa. Työn tavoitteena on mitoittaa lämmön lyhytaikaisvarasto Pori Energia Oy:n Porin kaukolämmön runkoverkkoon. Työn lopuksi selvitetään lämpövaraston käytöllä saavutettavaa säästöpotentiaalia ja tarkastellaan, onko investointi lämpövaraston rakentamiselle taloudellisesti kannattava.

# 2 Pori Energia Oy

Pori Energia Oy on Porin kaupungin omistama yhtiö. Sen liiketoiminta-alueihin kuuluu energian tuotanto, energiapalvelut, sekä käynnissäpito-, urakointi- ja tuulivoimapalvelut. Yhtiö myy asiakkailleen energiaa ja energiapalveluita. Yhtiö sai alkunsa vuonna 2006, kun Porin Lämpövoima Oy ja Pori Energia liikelaitos yhdistettiin. Pori Energian toiminta katsotaan alkaneeksi jo vuodesta 1898, jolloin perustetun sähkölaitoksen päätehtävänä oli hoitaa kaupunkivalaistus. Kaukolämpötoiminta Porissa alkoi vuonna 1969 ja tuulivoimaa yhtiö alkoi tuottamaan vuonna 1993. (Pori Energia 2019.) Emoyhtiön lisäksi Pori Energia -konserniin kuuluvat Pori Energia Sähköverkot Oy ja Tuulia Palvelut Oy. Pori Energia konsernin liikevaihto vuonna 2021 oli 124,7 miljoonaa euroa ja henkilöstöä sillä oli 195. (Pori Energia 2022a.) Pori Energialla on Porin kaukolämmön runkoverkon lisäksi kaukolämmön erillisverkkoja muualla Satakunnassa.

Porin kaukolämmön runkoverkkoon kuuluvat Aittaluodon ja Kaanaan CHP-voimalaitokset, joiden pääasiallisena polttoaineena toimii puu, turve ja kierrätyspolttoaineet. Kyseisissä CHP-voimalaitoksissa tuotettiin vuoden 2021 aikana 640 GWh kaukolämpöä, 82 GWh prosessilämpöä, 245 GWh prosessihöyryä ja 185 GWh sähköä (Pori Energia 2022a). CHP-laitosten lisäksi Porin kaukolämmön runkoverkossa toimii neljä huippu- ja varakäytössä olevaa lämpökeskusta, joiden polttoaineena käytetään kevyttä polttoöljyä. Lisäksi Pori Energialla on CHP-laitosten yhteydessä apukattiloita, joita käytetään huippukäytössä ja huoltoseisakkien aikana. Apukattiloiden polttoaineina käytetään maakaasua ja kevyttä polttoöljyä. Taulukossa 1 on esitettynä Porin kaukolämmön runkoverkon polttoainejakauma vuosilta 2021 ja 2020.

Taulukko 1. Pori Energian käyttämät polttoaineet kaukolämmön tuotannossa vuonna 2020 (Pori Energia 2022a).

| Käytetty polttoaine | Vuosi 2021 | Vuosi 2020 |
|---|---|---|
| Biopolttoaine | 70,8 % | 53,0 % |
| Turve | 10,0 % | 21,6 % |
| Lämmön talteenotto | 6,2 % | 12,1 % |
| Kierrätyspolttoaineet | 8,8 % | 7,8 % |
| LNG | 2,4 % | 4,9 % |
| Öljy + kivihiili | 1,8 % | 0,6 % |
| Tuotettu kaukolämpö [GWh] | 667 | 711 |

Taulukosta 1 huomataan, että Pori Energia on kasvattanut biopolttoaineiden osuutta vuodessa noin 17 prosenttia ja samalla turpeen käyttöä on vähennetty noin 12 prosenttia.

Tällä hetkellä Pori Energian sähkön- ja lämmöntuotanto on 75 prosenttisesti hiilineutraalia, ja tavoitteena on olla 90 % hiilineutraali vuoden 2024 aikana. Vuonna 2020 valmistui yli 60 miljoonan euron investointi uuteen Aittaluodon biokattilalaitokseen, mikä kasvatti hiilineutraalin sähkön- ja lämmöntuotantoa. (Pori Energia 2022b.) Pori Energia on myös selvittänyt mahdollisuutta ottaa hiilidioksidia talteen Aittaluodon CHP-laitokselta. Hankkeen toteutuessa saisi savukaasuista poistettua noin 100000 tonnia hiilidioksidia vuodessa. (Satakunnan Kansa 2022.)

# 3 Lämpöenergian varastointi

CHP-laitoksissa sähköntuotanto on tiukasti sidottuna lämmöntuotantoon ja laitoksia ajetaan lähtökohtaisesti lämmöntarpeen mukaan. Kun sähkön markkinahinta on korkea, voidaan CHP-laitoksen tuotantoa kasvattaa sähkön tuotannon lisäämiseksi ja tästä syntyvää ylimääräistä lämpöenergiaa voidaan varastoida lämpövarastoon. Tätä varastoitua lämpöenergiaa voidaan käyttää myöhemmin esimerkiksi lämmön kulutushuippujen aikana, kuten huippukuormalaitoksen korvaamiseksi. Lämpövaraston käytöllä voidaan korvata lämmön kulutushupuissa kalliimpaa huippukuormalaitoksilla tuotettua lämpöenergiaa, jolloin myös tuotetun energian hiilidioksidipäästöt laskevat. (Koskelainen & Saarela & Sipilä 2006, 384.) Lämmön varastointi onkin hyvä mahdollisuus energiayhtiöille niiden tavoitellessa päästövähennyksiä sähkön- ja lämmöntuotannossa.

Lämpöenergiaa voidaan varastoida kolmella eri menetelmällä: termokemiallisena, latenttina tai tuntuvana lämpöenergiana. Tuntuvan lämpöenergian varastointi perustuu lämpötilaeroon, ja sitä voidaan varastoida kiinteisiin, nestemäisiin tai kaasumaisiin materiaaleihin. Materiaaleja voivat olla esimerkiksi kallioperä ja betoni, sekä vesi ja ilma. Lämpöenergiaa varastoivan materiaalin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat: tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus (Guelpa & Verda 2019, 6). Vesi onkin yleisimmin käytetty tapa varastoida tuntuvaa lämpöenergiaa kaukolämpöverkon yhteydessä, sillä se soveltuu ominaisuuksiltaan hyvin lämpöenergian varastointiin.

Lämpöenergian varastoiminen latenttilämpönä perustuu faasimuutokseen, jossa lämpöenergia sitoutuu tai varastoituu. Latenttilämpövaraston yleisin faasimuutos on kiinteän aineen muuttuminen nesteeksi. Koskelainen et al. (2006, 385) mukaan käytetyimpiä latenttilämpövarastoja ovat höyryakkujen lisäksi erilaiset suolat, parafiinit ja rasvahapot. Latenttienergiaan perustuvilla lämpövarastoilla on huomattavasti korkeampi energiatiheys kuin tuntuvalla lämpöenergialla, mikä mahdollistaa varastoimisen pienempään tilaan. Latenttilämpövaraston käyttö kaukolämpöverkossa aiheuttaa haasteita, sillä faasimuutoslämpötilan tulee olla kaukolämmön meno- ja paluulämpötilojen välistä, mikäli lämpövarasto on kytketty kaukolämpöverkkoon suoralla kytkennällä. Latenttilämpövarastoja ei ole vielä hyödynnetty ison kokoluokan lämpövarastoissa. Parhaillaan niitä tutkitaan kokeellisissa kenttäympäristöissä. (Guelpa et al. 2019, 5–6.)

Termokemialliset lämpövarastot perustuvat palautuviin kemiallisiin reaktioihin, joissa sidosten muodostuessa lämpöenergiaa sitoutuu ja niiden katketessa lämpöenergiaa vapautuu. Termokemiallisten varastojen energiatiheys on noin kymmenkertainen tuntuvan lämpöenergian varastoihin verrattuna (Koskelainen et al. 2006, 385). Lisäksi termokemiallisen lämpövaraston lämpötila on lähes sama kuin ympäristön, jolloin lämpöhäviöt jäävät hyvin pieniksi. Termokemiallisia lämpövarastoja kehitetään parhaillaan ja niitä on testattu vasta laboratoriokokoluokassa. (Aydin & Casey & Riffat 2015, 358.) Ongelmana termokemiallisissa varastoissa on kemiallisten reaktioiden toistettavuus (Koskelainen et al. 2006, 385). Tällä hetkellä termokemiallisia lämpövarastoja ei voida pitää kannattavina kaukolämpöverkoissa.

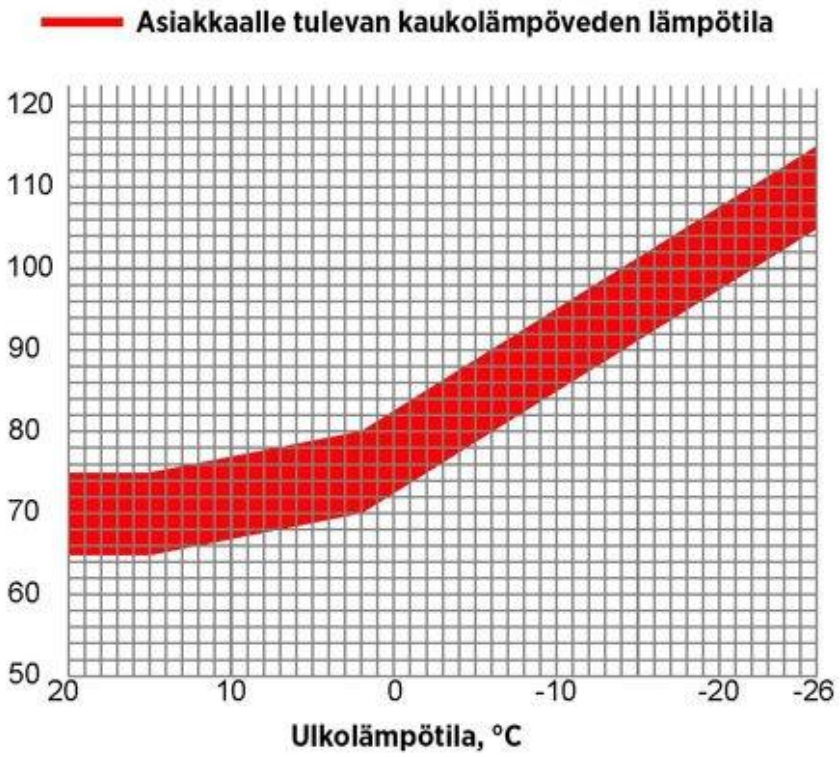
Tuntuvaa lämpöenergiaa voidaan varastoida veteen sekä lyhytaikaisesti että pitkäaikaisesti. Yleisesti ottaen lämmön lyhytaikaisvarastoinnissa varastoidaan tuhansia kuutioita kuumaa vettä eristettyyn terässäiliöön ja pitkäaikaisessa varastoinnissa lämpöä varastoidaan esimerkiksi betoni- tai kalliosäiliövarastoon. Kaukolämpövarasto voidaan kytkeä kaukolämpöverkkoon suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Näiden erona on se, että suorassa kytkennässä kaukolämpövarastossa kiertää kaukolämpövesi ja epäsuorassa kytkennässä kaukolämpöverkon ja -varaston välissä on lämmönvaihtimet kuumalle ja kylmälle puolelle, jolloin kaukolämpövarastolla on oma vesipiirinsä. Koska betonisäiliö sisältää epäpuhtauksia ja sen sisältämä kalkki liukenee veteen, tulee betonisäiliövarastossa käyttää epäsuoraa kytkentää. Myös kalliosäiliövarasto tulee kytkeä epäsuoralla kytkennällä epäpuhtauksien välttämiseksi. Kalliosäiliövarastona voi toimia esimerkiksi vanha öljyvarasto, joka on tiivistetty ja vahvistettu ennen sen käyttöönottoa lämpövarastona. Kalliosäiliövarastoihin voidaan varastoida vettä korkeassa, jopa 140 asteen lämpötilassa, jonka suuren vesimassan synnyttämä paine mahdollistaa. (Koskelainen et al. 2006, 387.)

Vesi kerrostuu eri lämpötiloissa, jolloin kuuma vesi jää lämpövaraston yläosaan ja kylmä vesi kerrostuu pohjalle. Kaukolämpöakun lataus tapahtuu niin, että sen yläosaan pumpataan kaukolämpöverkon menopuolen kuumaa kaukolämpövettä ja samaan aikaan alaosasta poistetaan sama määrä viileämpää vettä kaukolämpöverkon paluulinjaan. Kaukolämpöakun purussa sen yläosan kuumaa vettä pumpataan kaukolämpöverkon menolinjaan ja sama määrä vettä tuodaan paluulinjasta lämpöakun alaosaan. Lämpöakku toimii siis ladattaessa lämmön kuluttajana ja purettaessa lämmön tuottajana. Lämpöakkua ladataan ja puretaan diffuusorien kautta, jotka ehkäisevät veden sekoittumista lämpöakussa. (Phetteplace 2013, 7.12.)

Phetteplacen (2013, 7.13) mukaan lämpövarastoihin muodostuu noin metrin korkuinen lämpötilojen gradienttikerros, joka erottaa kuuman ja kylmän veden toisistaan. Tämä kerros olisi pidettävä mahdollisimman pienenä. Tämä tulee ottaa huomioon lämpövaraston fyysisten mittojen suunnittelussa. Lämpötilagradienttikerroksen minimoimiseksi tulisi lämpövaraston korkeuden suhde halkaisijaan olla mahdollisimman suuri. Kaukolämpöakkujen suunnittelijat ovat pitäneet sopivana arvona korkeuden suhteena halkaisijaan vähintään 1,5 (Phetteplace 2013, 7.12).

Kaukolämpöakun mitoituksessa tulee myös huomioida, että lämpövaraston vaipan pintaalan kasvaessa lämpöhäviöt lämpöakusta ympäristöön kasvavat. Koskelainen et al. (2006, 386) mukaan terässäiliön lämpöhäviöteho lyhytaikaisvarastoinnissa on 10–15 W/m$^2$.

Kaukolämmön menolämpötila määräytyy vallitsevan ulkolämpötilan mukaan. Kaukolämmön menoveden säätökäyrä esitettynä kuvassa 1.

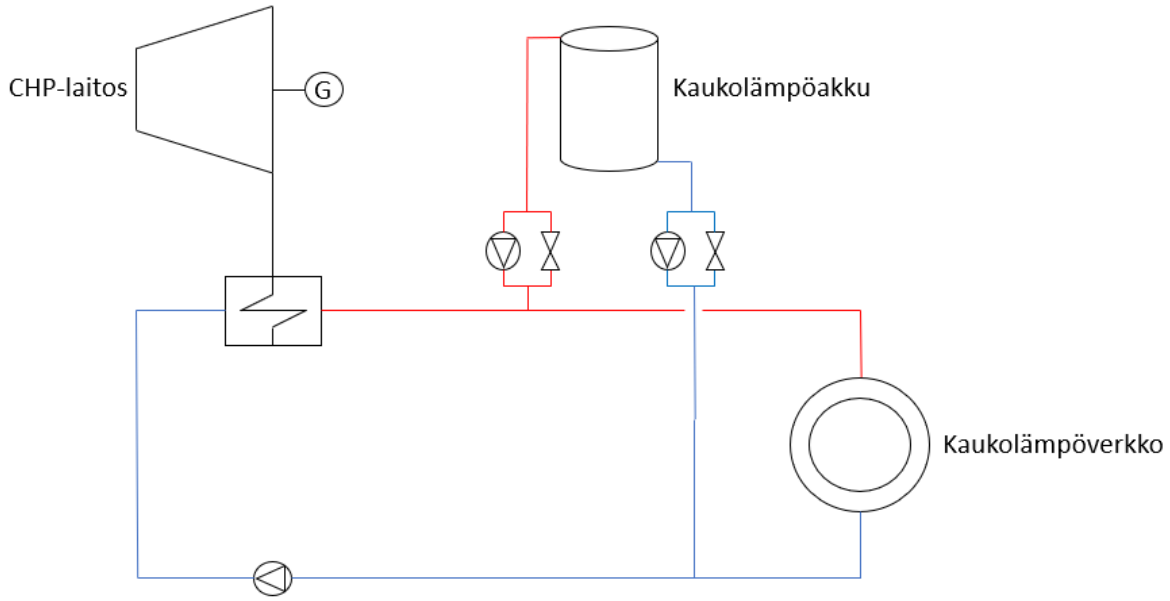



Kuva 1. Kaukolämmön menoveden säätökäyrä (Helen 2022).

Kuvasta 1 huomataan, että kaukolämmön menoveden lämpötila ylittää 100 asteen rajan vain kovilla pakkasilla. Koska vesi kiehuu ilmanpaineessa noin sadassa asteessa, tulisi kaukolämpöakun sisällä olla korkeampi paine, mikäli halutaan kasvattaa varastoitavan veden lämpötilaa.

## 3.1 Suora kytkentä

Suorassa kytkennässä lämpövaraston yläosa on kytketty kaukolämpöverkon menolinjaan ja alaosa paluulinjaan. Kaukolämpöakku voi olla kytkettynä samaan paineeseen kaukolämpöverkon kanssa, tai olla paineeltaan eristetty, jolloin kaukolämpöakulla on omat pumput sen lataukseen ja purkuun. Tällöin kaukolämpöakkua voidaan käyttää kaukolämpöverkon tilasta riippumatta. Kun kaukolämpöveden lämpötila muuttuu verkossa, laajenee ja supistuu vesi jonkin verran. Suora kytkentä mahdollistaa kaukolämpöakun käytön kaukolämpöverkon paisunta-astiana. Toinen etu suorassa kytkennässä on se, että kaukolämpöakun vettä voidaan käyttää vesireservinä esimerkiksi ison kaukolämpövuodon sattuessa. (Koskelainen et al. 2006, 339 & 384.) Kytkettäessä lämpövarasto suoralla kytkennällä kaukolämpöverkkoon, jää lämpövaraston katon ja veden pinnan väliin tyhjä tila, joka hapen pääsyn estämiseksi täytetään yleisesti höyryllä 10–25 millibaarin ylipaineeseen (Koskelainen et al. 2006, 386). Tyhjän tilan täytössä voidaan käyttää myös typpeä. Kaukolämpöakun kytkentä kaukolämpöverkkoon suoralla kytkennällä on esitettynä kuvassa 2.




Kuva 2. Kaukolämpöakun suora kytkentä kaukolämpöverkkoon.

Kuvasta 2 huomataan, että kaukolämpöakun ja kaukolämpöverkon välissä on venttiili-pumppuasemat, joilla säädetään kaukolämpöakkuun ladattavan ja sieltä purettavan veden painetta.

## 3.2 Epäsuora kytkentä

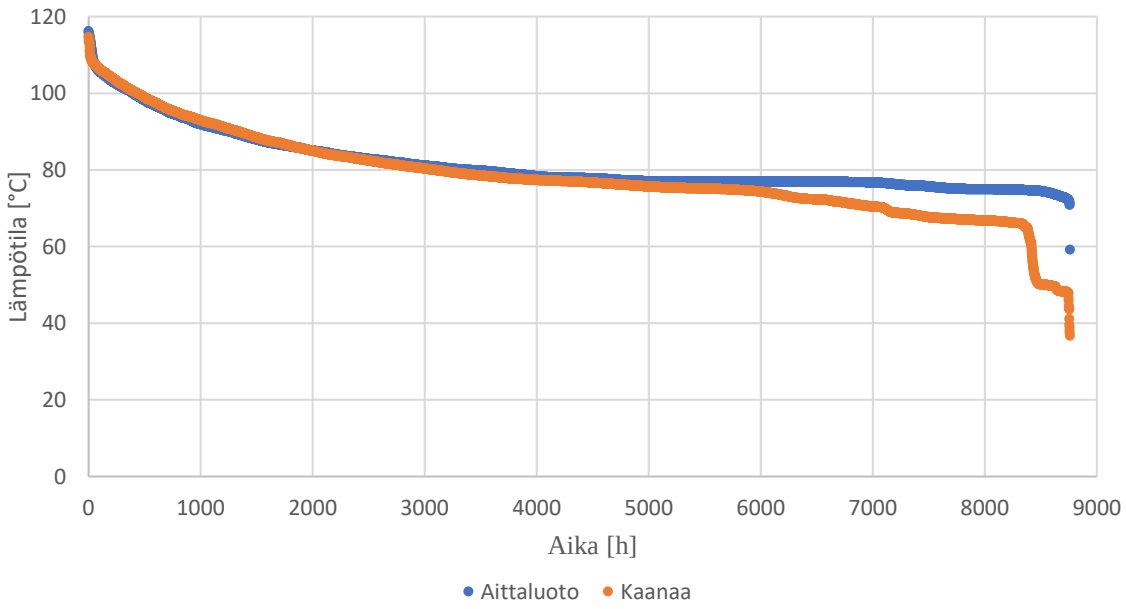
Epäsuoraa kytkentää voidaan käyttää silloin, kun halutaan varastoida yli sata asteista vettä. Epäsuora kytkentä mahdollistaa kaukolämpöakun paineistamisen, kun lämpövarasto ei ole suoraan kytkettynä kaukolämpöverkkoon. Veden höyrystymislämpötila on korkeampi paineen kasvaessa. Suurimmissa lämpövarastoissa noin kahden baarin ylipaine riittää. Tällöin voidaan varastoida noin 120 asteista vettä. Epäsuoran kytkennän vaatimat lämmönsiirtimet kasvattavat kaukolämpöakun rakennuskustannuksia. Lämmönsiirtimet myös heikentävät lämpövaraston hyötysuhdetta niiden asteisuuden verran. Epäsuoran kytkennän etuna on, että mahdolliset epäpuhtaudet lämpövarastossa eivät ole haitaksi. (Koskelainen et al. 2006, 389.)

# 4 Lämpövaraston mitoitus

Tässä kappaleessa valitaan soveltuvin tekniikka Porin kaukolämmön runkoverkkoon kytkettävään lämpövarastoon ja määritetään sille lämpökapasiteetti, sekä tilavuus. Lisäksi kappaleessa esitellään laskelmat lämpöakun käytöstä syntyvälle säästöpotentiaalille. Lämpövarasto mitoitetaan Pori Energian vuoden 2021 kaukolämmön tuotanto- ja kulutusdatan mukaan.

Paras vaihtoehto ison kokoluokan lämmön lyhytaikaiseen varastointiin on lämmön varastointi tuntuvana lämpöenergiana. Vesi soveltuu hyvin lämpövarastomateriaaliksi johtuen sen korkeasta ominaislämpökapasiteetista, sekä tiheydestä että alhaisesta hinnasta. Lisäksi käytettäessä vettä lämpövarastona voidaan silloin käyttää yksinkertaista tekniikkaa.

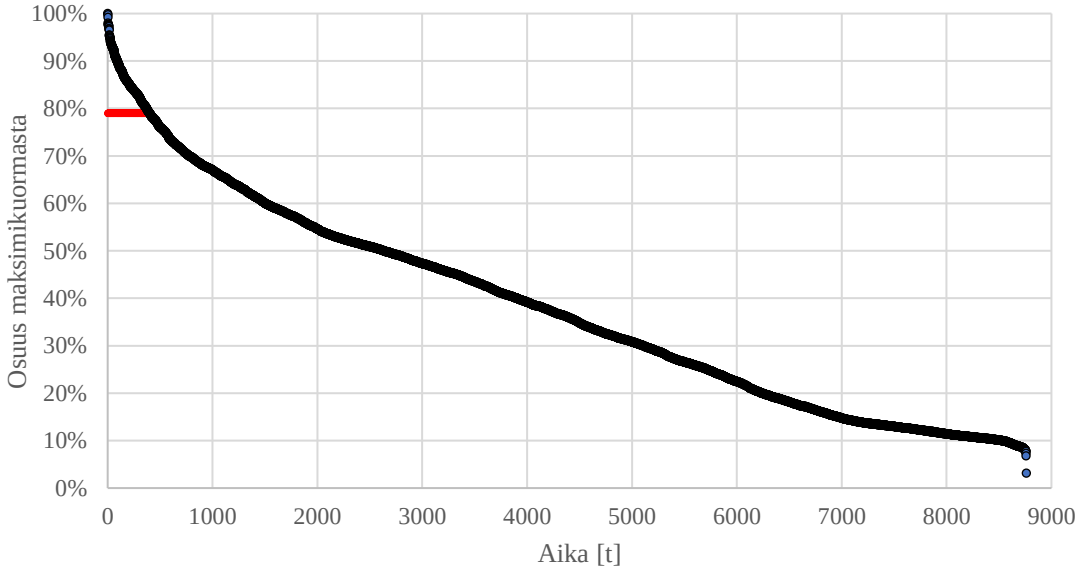
Vuonna 2021 menolämpötila vaihteli välillä 60–115 °C ja paluulämpötila välillä 30–60 °C. Kuvassa 3 on esitettynä pysyvyyskäyrä Pori Energian Aittaluodon ja Kaanaan CHP-laitosten menoveden lämpötiloista.




Kuva 3. Kaukolämmön menoveden lämpötilan pysyvyyskäyrä Porin kaukolämmön runkoverkon CHP-laitoksilta vuodelta 2021.

Vuoden 2021 aikana oli kaukolämmön menolämpötila yli 100 astetta noin 400 tuntia Aittaluodon voimalaitoksella ja noin 440 tuntia Kaanaan voimalaitoksella. Mikäli kaukolämpöakkuun halutaan varastoitavaksi yli 100 asteista vettä, edellyttäisi se paineellista säiliötä ja epäsuoraa kytkentää. Vaikka korkeammassa lämpötilassa varastoitavaa vettä voitaisiin käyttää korkeimmissakin kulutushuipuissa, kasvaa samalla lämpövaraston lämpöhäviöt ja säiliön rakennuskustannukset vaadittavien lämmönsiirtimien vuoksi. Tulevaisuudessa mahdollisesti lisääntyvä matalalämpökaukolämpö tulee alentamaan menolämpötiloja kaukolämpöverkoissa. Pori Energialla matalalämpökaukolämpö tarkoittaa kaikkien asiakaslaitteiden uusimista, mikä tulisi kestämään noin 25 vuotta. Asia on hyvä ottaa huomioon, jos lämpövarastoa halutaan hyödyntää esimerkiksi Pori Energian erillisverkoissa, joissa asiakaslaitteiden uusiminen olisi huomattavasti nopeampi prosessi.

Huhtinen et al. (2013, 12–14) mukaan CHP-voimalaitokset rakennetaan niin, että niiden teho on noin 50 % kaukolämmön huipputehosta. Tällä tavoin CHP-laitokselle saadaan pitkä vuotuinen käyttöaika. Vuonna 2021 saavutettiin kaukolämmön tuotannon huipputeho 15. tammikuuta, kun kaukolämmön yhteenlaskettu tuotanto oli noin 225 MWh. Kaukolämmön tuotannon pysyvyyskäyrä on esitettynä kuvassa 4, jossa punainen viiva rajaa CHP-laitosten tuotantokapasiteetin maksimin. Punaisen viivan yläpuolella oleva osuus on tuotettava huippukuormalaitoksilla. Pori Energia Oy:n CHP-laitosten kaukolämmön tuotantokapasiteetin maksimi on noin 200 megawattia, mikä vastaa 89 prosenttia kuvasta 4. Loput 11 prosenttia kaukolämpötehosta on tuotettava huippukuormalaitoksilla.




Kuva 4. Porin alueen kaukolämmön tuotannon pysyvyyskäyrä vuodelta 2021.

Huipunkäyttöaika kuvaa vuosienergian ja huipputehon suhdetta. Kun CHP-laitoksilla tuotettu vuosienergia 667 GWh jaetaan laitosten maksimikaukolämpöteholla 200 MWh saadaan huipunkäyttöajaksi 3335 tuntia vuodessa. Koskelainen et al. (2006, 41) mukaan huipunkäyttöaika on tavallisesti noin 3200 tuntia vuodessa. Korkeampi huipunkäyttöaika kertoo siitä, että kaukolämmön kulutus on tasaista.

Kaukolämpöakun taloudellista hyötyä selvitetään simuloimalla sen käyttöä Excelissä. Lisäksi lasketaan taloudellinen säästö öljyn käytön vähenemisellä ja sitä kautta hiilidioksidipäästöjen väheneminen. Lisäksi selvitetään investoinnille takaisinmaksuaika kahdeksan prosentin korkokannalla. Tulosten pohjalta arvioidaan investoinnin kannattavuutta.

Lämpövaraston mitoittamiseksi tulee lähteä liikkeelle siitä, mitä kaukolämpöakulla halutaan korvata ja millä energialähteellä sitä ladataan. Kaukolämpöakku voidaan mitoittaa korvaamaan jokin käytössä olevista huippulämpölaitoksista. Puuvillan lämpölaitos sopisi hyvin korvattavaksi lämpölaitokseksi, sillä se on viime vuodet ollut melko vähäisellä käytöllä. Lisäksi sen sijainti on noin 1,3 kilometriä Aittaluodon CHP-laitoksesta. Puuvillan lämpölaitos tuotti vuoden 2021 aikana kaukolämpöä 633 megawattituntia. Vuonna 2021 suurin yhtäjaksoinen lämmön tuotantomäärä kyseisellä lämpölaitoksella oli 7.–8. joulukuuta, jolloin se tuotti 28 tunnin aikana noin 350 MWh kaukolämpöä. Kaukolämpöä tuotettiin korkeimmillaan noin 21 megawattia tunnissa. Tämä määrittää minimipurkutehon kaukolämpöakulle. Puuvillan lämpölaitoksen korvaamisen lisäksi, voidaan kaukolämpöakkua hyödyntää myös apukattilan käytön vähentämisessä. Kevyt polttoöljykäyttöinen apukattila tuotti vuoden 2021 aikana kaukolämpöä yhteensä 12,4 GWh.

Valitaan joulukuun 7.–8. päivien Puuvillan lämpökeskuksen lämmöntuotannon mukaan mitoitettavan lämpövaraston lämpökapasiteetiksi 400 MWh ja lataus- ja purkutehoksi 30 MW. Kyseisellä lämpövarastokapasiteetilla, sekä lataus- ja purkuteholla on mahdollista korvata Puuvillan lämpölaitos ja sillä voidaan vähentää apukattiloiden käyttöä, jolloin se luo myös paremman mahdollisuuden tuottaa enemmän sähköä. Kasvatettaessa kaukolämpöakun purku- ja lataustehoa voidaan saavuttaa korkeammat säästöt, sillä tällöin voidaan tietyssä ajassa purkaa enemmän lämpöenergiaa kaukolämpöverkkoon.

Laskennan aluksi lasketaan lämpövaraston tilavuus. Lämpövaraston tilavuuteen vaikuttavat kaukolämpöverkon paluu- ja menolinjan lämpötilaero, lämpövaraston lämpöteho, sekä veden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti. Vuonna 2021 kaukolämpöveden keskimääräinen

menolämpötila Aittaluodon CHP-laitokselta oli 81,5 astetta ja keskimääräinen paluulämpötila 44,6 astetta. Tällöin keskimääräiseksi lämpötilaeroksi $\Delta T$ saadaan noin 37 astetta.

Lämpövaraston tilavuus lasketaan yhtälöllä (Streckiene G., Martinaitis V., Andersen A., Katz J. 2009, 2311),

$$V_{\text{akku}} = \frac{Q_{\text{akku}}}{\overline{\rho} \cdot \overline{c_{\text{p}}} \cdot \Delta T} \tag{1}$$

jossa $Q_{\text{akku}}$ on lämpöenergia akussa [J], $\overline{\rho}$ on veden keskimääräinen tiheys [kg/m$^3$], $\overline{c_{\text{p}}}$ on veden keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti [J/kgK] ja $\Delta T$ on meno- ja paluulinjojen lämpötilaero [K].

Koska lämpövaraston koko tilavuus ei ole käytettävissä veden varastoimiseen yläosassa olevan höyryn vuoksi, käytetään lämpövaraston käytettävissä olevan tilavuuden hyötysuhteena $\eta_{\text{til}}$ 94 %. Veden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti on katsottu lämpötilassa 63 °C. Tällöin lämpövaraston tilavuus saadaan laskettua yhtälöllä

$$V_{\text{akku}} = \frac{Q_{\text{akku}}}{\overline{\rho} \cdot \overline{c_{\text{p}}} \cdot \Delta T \cdot \eta_{\text{til}}} \tag{2}$$

$$V_{\text{varasto}} = \frac{400\ \text{MWh} \cdot 3{,}6 \cdot 10^9\ \frac{\text{J}}{\text{MWh}}}{981{,}6\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4190\ \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 37\ \text{K} \cdot 0{,}94} \approx 10067\ \text{m}^3 \tag{2}$$

Lämpövaraston tilavuus voidaan ratkaista myös seuraavasta yhtälöstä.

$$Q_{\text{akku}} = V_{\text{akku}} \cdot e \cdot \Delta T \cdot \eta_{\text{til}} \tag{3}$$

Jossa $e$ on veden energiatiheys 1,16 [kWh/m$^3$K] (Huhtinen et al. 2006, 386).

$$V_{\text{akku}} = \frac{Q_{\text{akku}}}{e\Delta T\eta_{\text{til}}} \tag{4}$$

$$V_{\text{akku}} = \frac{400 \cdot 10^3 \text{ kWh}}{1{,}16 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3\text{°C}} \cdot 37 \text{ °C} \cdot 0{,}94} \approx 9914 \text{ m}^3 \tag{4}$$

Yhtälöillä 2 ja 4 lasketut lämpövaraston tilavuudet ovat melko lähellä toisiaan. Valitaan kaukolämpöakun tilavuudeksi pyöristetty arvo 10000 $m^3$.

Kaukolämpöakun tilavuuden ollessa 10000 $m^3$ ja korkeuden suhde halkaisijaan ollessa 1,6, on kaukolämpöakun sisähalkaisija 20 metriä ja korkeus 32 metriä.

## 4.1 Lämpövaraston kustannukset

Lämpövaraston kustannukset aiheutuvat sen rakentamiskustannuksista, jotka koostuvat terässäiliöstä ja sen eristämisestä, sekä lämpövaraston kytkentäkustannuksista kaukolämpöverkkoon. Terässäiliövaraston pääomakustannukset voidaan Koskelainen et al. (2006, 398) mukaan selvittää laskemalla lämpövaraston kustannus akun tilavuuden funktiona, sekä lämpövaraston kytkentäkustannus purku- ja lataustehon funktiona,

$$H_{\text{V,akku}} \approx 0{,}028 \cdot V_{\text{akku}} + 30 \tag{5}$$

$$H_{\theta} \approx 6{,}358 \cdot \theta + 5{,}26 \tag{6}$$

$$H_{\text{akku}} = H_{\text{V,akku}} + H_{\theta} \tag{7}$$

joissa $H_{\text{V,akku}}$ on kaukolämpöakun tilavuudesta riippuva investointikustannus [k€], $H_{\theta}$ on kaukolämpöakun purku- ja lataustehosta riippuva investointikustannus [k€], $\theta$ on purku- ja latausteho [MW] ja $H_{\text{akku}}$ on kaukolämpöakun investointikustannus [M€].

Lämpöakun tilavuudesta riippuvassa investointikustannuksessa tulee kuitenkin huomioida, että yhtälöt 5 ja 6 ovat vuoden 2006 kirjallisuudesta, minkä jälkeen rakennuskustannukset ja erityisesti teräksen hinta on noussut huomattavasti. Vuonna 2006 teräksen hinta oli noin 840

dollaria kuutiolta, kun vuoden 2022 huhtikuussa se oli 2177 dollaria kuutiolta (Steel-Benchmarker 2022). Tämä tarkoittaa 252 prosentin nousua teräksen hinnassa. Huomioidaan tämä lisäämällä kaukolämpöakun tilavuudesta riippuvaan investointikustannukseen 252 prosenttia.

$$H_{\mathrm{V,akku}} = (0{,}028 \cdot 10000 + 30) \cdot 2{,}52 = 781{,}3\ \mathrm{k€} \tag{5}$$

$$H_{\theta} \approx 6{,}358 \cdot 30 + 5{,}26 = 196{,}0\ \mathrm{k€} \tag{6}$$

Tällöin kaukolämpöakun hankintakustannukseksi saadaan

$$H_{\mathrm{akku}} = 196{,}0\ \mathrm{k€} + 789{,}8\ \mathrm{k€} = 977{,}3\ \mathrm{k€} \tag{7}$$

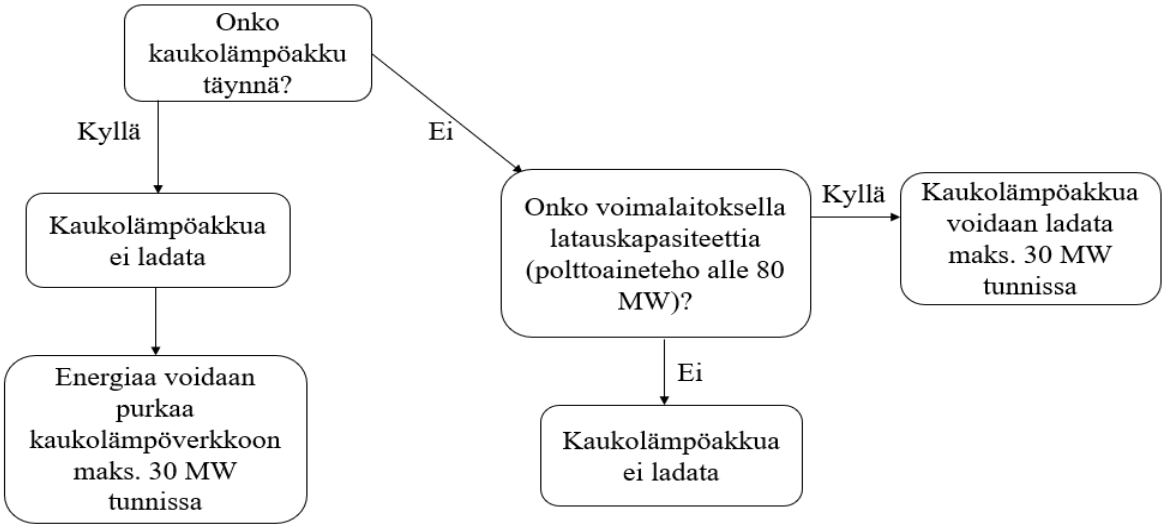
Edellä laskettu kaukolämpöakun investointikustannus ei vastaa lähivuosina Suomessa rakennettujen kaukolämpöakkujen hintoja. Esimerkiksi Haapaniemellä otettiin vuonna 2020 käyttöön 15000 $m^3$ ja noin 800 MWh kaukolämpöakku, jonka lataus- ja purkuteho on 85 MW. Kyseinen kaukolämpöakku kustansi 5,8 miljoonaa euroa, eli noin 387 €/$m^3$ (Sähköviesti 2021). Etelä-Savon Energia otti vuonna 2015 käyttöön 7000 $m^3$ ja 350 MWh kaukolämpöakun, jonka lataus- ja purkuteho on 30 MW. Kyseinen kaukolämpöakku kustansi noin 2,5 miljoonaa euroa, eli 357 €/$m^3$ (Energiatehokkuussopimukset 2019).

Teräksen hinta on noussut vuosien 2020 ja 2022 välillä noin 50 prosenttia, mikä on otettava huomioon kaukolämpöakun hinnan arvioinnissa (Trading Economics 2022). Arvioidaan kaukolämpöakun hinta lisäämällä Haapaniemellä rakennetun kaukolämpöakun hintaan 50 prosenttia, jolloin hinnaksi tulee noin 581 €/$m^3$. Tällöin tilavuudeltaan 10000 $m^3$ kaukolämpöakun hinnaksi tulisi 5,81 miljoonaa euroa.

## 4.2 Lämpövaraston käytöllä saavutettavat säästöt

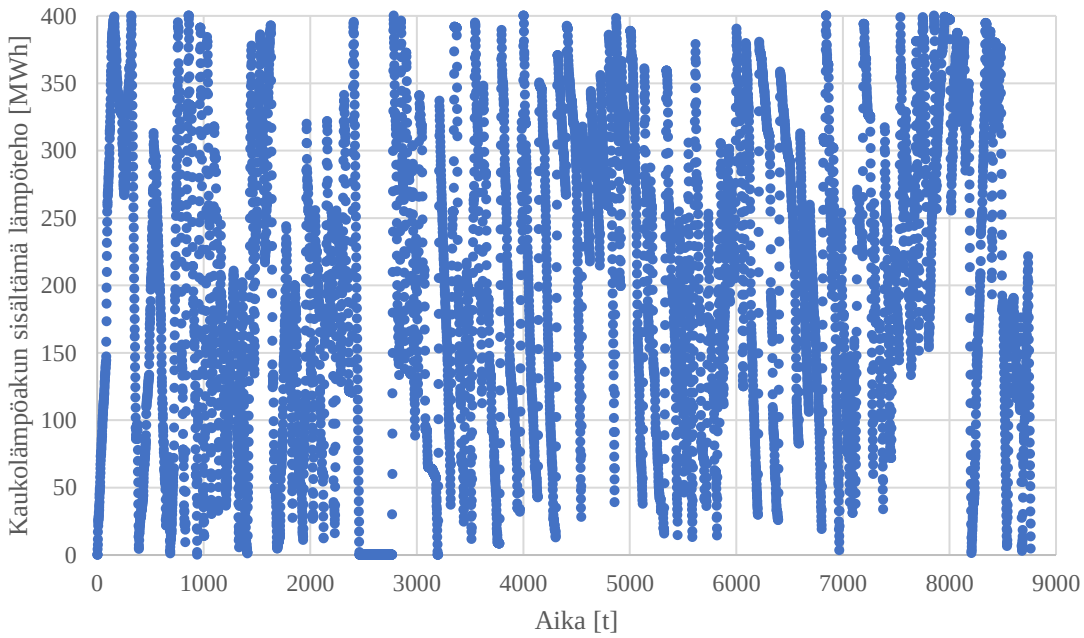
Säästöt kaukolämpöakun käytöstä syntyvät lämpölaitosten ja apukattilan pienemmästä kevyen polttoöljyn kulutuksesta, sekä lisätuotoista sähkönmyynnistä. Öljyn käytön vähentyessä myös päästöoikeuksista maksettava hinta on alhaisempi. Toisaalta polttoainekustannukset kasvavat CHP-laitosten osalta, kun öljyllä tuotettua energiaa korvataan hakkeella tuotetulla energialla.

Laskenta ja Excel-simulointi suoritetaan Aittaluodon CHP-laitoksen näkökulmasta, eikä Kaanaan CHP-laitosta ole huomioitu esimerkiksi latauskapasiteetin osalta. Aittaluodon CHP-laitoksen maksimi polttoaineteho on 80 MW ja turbiinin sähköteho on 15,62 megawattia. Laskennan lähtötietoina on vuoden 2021 tuntikohtainen data Aittaluodon CHP- ja apukattilan tehoista, kaukolämpöverkkoon syötetystä lämpötehosta, turbiinin tuottamasta sähköstä sekä tuntikohtainen sähkönhinta. Excel-simuloinnissa selvitetään aluksi joka tunnille kaukolämpöakun latausteho, mihin vaikuttaa CHP-kattilan teho, sekä maksimi lataus- ja purkuteho 30 megawattia. Laskennassa tulee ottaa huomioon, että CHP-kattilan polttoainetehon ollessa yli 80 MW ei kaukolämpöakkua voida ladata. Kaukolämpöakun latauksessa on oletuksena, että kattilaa ajetaan 80 MW:n polttoaineteholla, ellei akkua voida ladata 30 MW:n teholla. Latauskapasiteetissa huomioidaan myös rakennusaste, mikä on nettosähkötehon suhde tuotettuun kaukolämpötehoon. Rakennusasteen arvona käytetään 0,35. Lisäksi kaukolämpöakulle huomioidaan joka tunnille noin 40 kW lämpöhäviö. Kuvassa 5 on esitettynä vuokaavio logiikasta, johon kaukolämpöakun lataus perustuu.

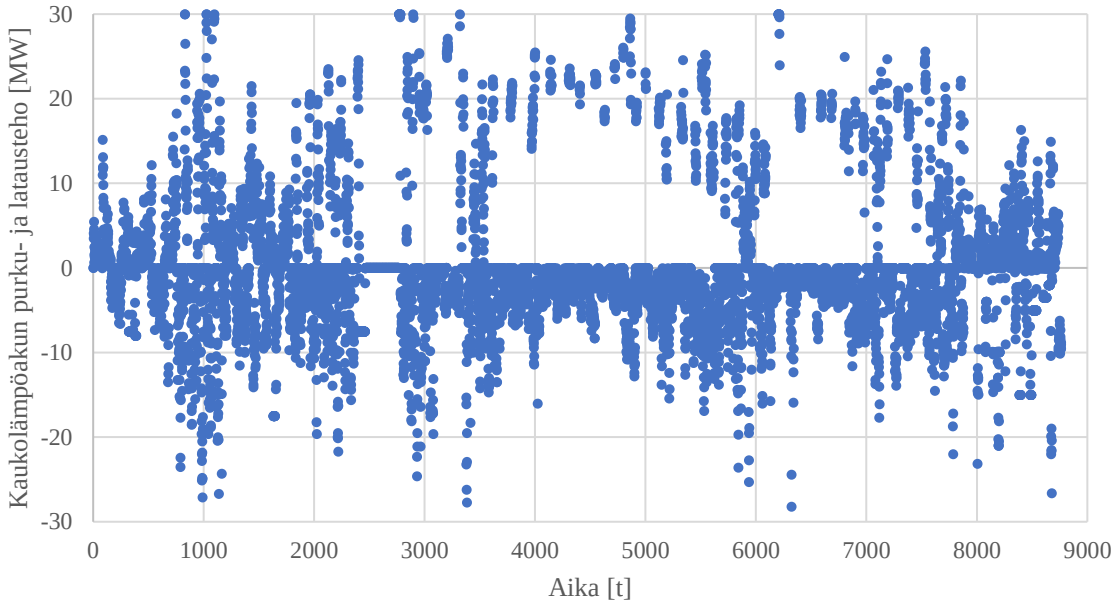



Kuva 5. Vuokaavio kaukolämpöakun latauksesta.

Kuvassa 6 on esitettynä kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia ja kuvassa 7 kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho ajan funktiona.




Kuva 6. Kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia ajan funktiona.




Kuva 7. Kaukolämpöakun lataus- ja purkuteho ajan funktiona.

Kuvasta 7 huomataan, että kaukolämpöakun lataus tapahtuu vain muutamia kertoja täydellä 30 megawatin teholla. Purettaessa kaukolämpöakkua on teho maltillisempi kuin latauksessa ja näin ollen kaukolämpöakusta saadaan purettua lämpöenergiaa tasaisemmin ja pidempikestoisesti.

Seuraavaksi arvioidaan, kuinka paljon vuonna 2021 olisi voinut tuottaa enemmän sähköä, mikäli käytössä olisi ollut lämpökapasiteetiltaan 400 MWh kaukolämpöakku. Lisääntynyt sähkön tuotanto perustuu siihen, että ladattaessa kaukolämpöakkua voidaan tuottaa rakennusasteen verran enemmän sähköä kaukolämpöakun tuntikohtaisesta latauksesta, mikäli turbiini ei rajoita sähkötehon lisäämistä. Laskennan tavoitteena oli korvata kaukolämpöakulla Puuvillan lämpölaitos ja sen lisäksi käyttää kaukolämpöakkua CHP-kattilan kuorman tasaamiseksi. Ajettaessa kaukolämpöakkua kuvissa 4 ja 5 esitetyillä tavoilla, olisi vuonna 2021 voitu tuottaa noin 79 tuhannen euron edestä enemmän sähköä. Laskennassa käytetyt Excel-lauseet ovat esitettynä liitteessä 1.

## 4.3 Lämpövaraston taloudellinen kannattavuus

Lämpövaraston kannattavuuteen vaikuttaa kaukolämpöakun investointikustannuksen lisäksi kaukolämpöakun käyttökustannukset, sekä vuosittaiset säästöt kevyen polttoöljyn käytön vähenemisestä ja lisätulot kasvaneesta sähköntuotannosta. Paineistamattoman lämpövaraston käyttökustannukset muodostuvat seinien lämpöhäviöistä, pumppauskustannuksista, sekä lämpövaraston yläosan jatkuvasta höyrypatjan ylläpidosta. Excel-simuloinnissa on otettu lämpöhäviöt huomioon. Taulukossa 2 on esitettynä hinnat päästöoikeuksille, kevyelle polttoöljylle, sekä hakkeelle.

Taulukko 2. Päästöoikeuden, hakkeen ja kevyen polttoöljyn hinta (Tilastokeskus 2022a, 2022c.)

| | |
|---|---|
| Päästöoikeus [€/t] | 85 |
| Hake [€/MWh] | 24,3 |
| Kevyt polttoöljy [€/MWh] | 117,9 |

Tarkastellaan seuraavaksi investoinnin kannattavuutta korvaamalla Puuvillan lämpölaitos kaukolämpöakulla. Säästöistä merkittävin osuus syntyy lämmön tuottamisella kevyen polttoöljyn sijaan hakkeella. Kevyen polttoöljyn käytössä pitää huomioida myös syntyvä hiilidioksidimäärä ja siitä maksettavat päästöoikeudet. Kevyen polttoöljyn päästökerroin lämmöntuotannossa on 70,2 t/TJ, eli noin 255 kg$CO_2$/MWh (Tilastokeskus 2022b).

Puuvillan lämpölaitoksella tuotettiin lämpöenergiaa vuonna 2021 yhteensä 730 MWh. Taulukossa 3 on esitettynä, kuinka paljon Puuvillan lämpölaitoksen korvaaminen kaukolämpöakulla olisi tuonut säästöä. Lisäksi taulukossa on esitettynä kevyen polttoöljyn, sekä sen käytöstä aiheutuvien päästöjen hinta. Lisäksi laskennassa on huomioitu, kuinka paljon öljyllä tuotetun lämpömäärän tuottaminen hakkeella olisi maksanut.

Taulukko 3. Saavutettava säästö ja kustannukset kevyelle polttoöljylle ja hakkeelle, kun polttoainetta käytetään 730 MWh.

| Polttoaine (730 MWh) | Polttoaineen hinta [€] | Päästöt [t CO2] | Päästöoikeuksien hinta [€] | Kustannukset yhteensä [€] |
|---|---|---|---|---|
| Kevyt polttoöljy | 86067 | 186 | 15830 | 101897 |
| Hake | 17739 | | | 17739 |
| Säästö [€] | | | | 84158 |

Taulukosta 3 huomataan, että korvaamalla Puuvillan lämpölaitos hakkeella tuotetulla lämpöenergialla voidaan saavuttaa noin 84000 euron säästöt. Tämän lisäksi kaukolämpöakun käytöllä olisi ollut mahdollista vähentää apukattilan käyttöä noin 2623 MWh. Apukattilan käytön vähenemisestä syntyvä säästö on esitettynä taulukossa 4.

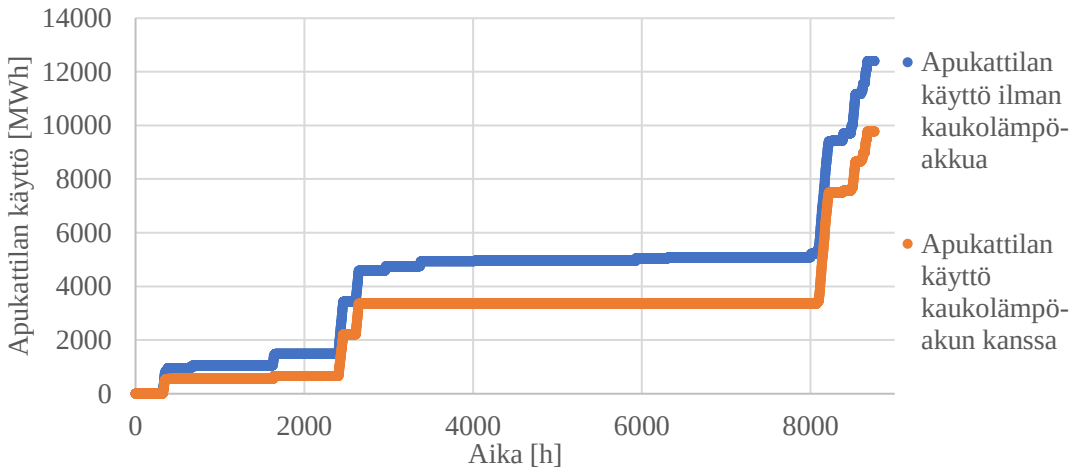
Taulukko 4. Säästö ja kustannukset kevyelle polttoöljylle ja hakkeelle, kun polttoainetta käytetään 2622,6 MWh.

| Polttoaine (2622,6 MWh) | Polttoaineen hinta [€] | Päästöt [t CO2] | Päästöoikeuksien hinta [€] | Kustannukset yhteensä [€] |
|---|---|---|---|---|
| Kevyt polttoöljy | 309205 | 669 | 56845 | 366050 |
| Hake | 63729 | | | 63729 |
| Säästö [€] | | | | 302320 |

Taulukoista 3 ja 4 huomataan, että Puuvillan lämpölaitoksen korvaaminen kaukolämpöakulla ja apukattilan käytön väheneminen olisi tuottanut yhteensä noin 386 tuhannen euron säästöt vuonna 2021.

Apukattilan käytön korvaaminen kaukolämpöakulla olisi vuonna 2021 vähentänyt Porin kaukolämmön runkoverkon öljyn käyttöä huomattavasti. Apukattilan 2622 MWh:n vähennys olisi vähentänyt öljyn käyttöä koko runkoverkossa 9,6 prosenttia ja yhdessä Puuvillan lämpölaitoksen kanssa öljyn käyttö olisi vähentynyt 12,3 prosenttia. Apukattilan tuottaman energian määrä olisi vähentynyt noin 21 prosenttia. Porin kaukolämmön runkoverkon hiilidioksidipäästöt ovat 61 kg $CO_2$/MWh ja runkoverkkoon tuotetun energian hiilidioksidipäästö vuonna 2021 oli noin 40700 tonnia. Kaukolämpöakulla olisi säästänyt noin 855 tonnia hiilidioksidipäästöjä, jolloin runkoverkon hiilidioksidipäästöt olisivat laskeneet 2,1 prosenttia. Kevyttä polttoöljyä olisi voitu säästää yhteensä noin 3353 MWh, mikä vastaa tilavuudeltaan 335,3 $m^3$.

Kuvassa 9 on esitettynä apukattilan käyttö ilman kaukolämpöakkua ja kaukolämpöakun kanssa.




Kuva 9. Apukattilan käyttö ilman kaukolämpöakkua ja kaukolämpöakun kanssa.

Kuvasta 9 huomataan, että apukattilan käyttöä voidaan vähentää kaukolämpöakulla erityisesti kesällä, jolloin apukattilan tuottama energia voitaisiin purkaa kaukolämpöakusta.

Kun huomioidaan vielä 79 tuhannen euron lisätulot lisääntyneestä sähköntuotannosta, saadaan kaukolämpöakun käytöllä saavutettavaksi säästöksi yhteensä 465 tuhatta euroa. Takaisinmaksuaika voidaan laskea takaisinmaksuajan menetelmällä,

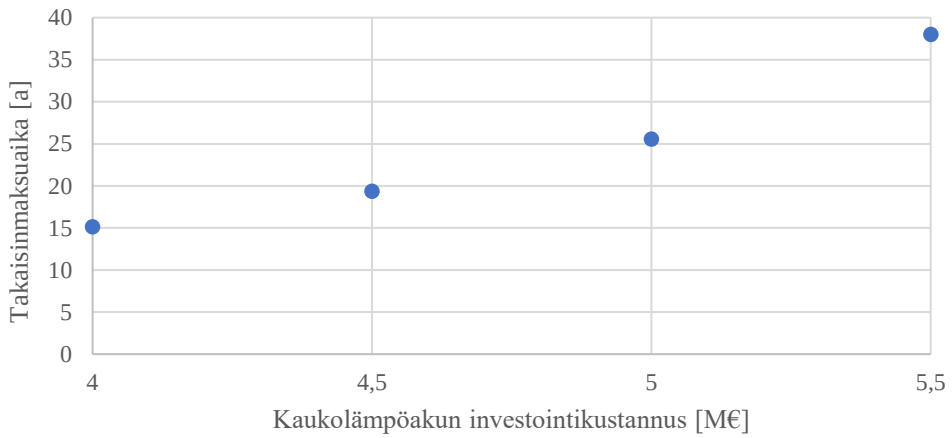
$$\mathrm{n} = \frac{-\ln\left(\frac{1}{i} - \frac{I}{q}\right) - \ln(i)}{\ln(1+i)} \tag{8}$$

jossa $I$ on investoinnin hankintameno [€], $q$ on vuosittainen tulo [€] ja $i$ on laskentakorkokanta.

Lasketaan investoinnin takaisinmaksuaika yhtälöllä 8, kun kaukolämpöakun hinta on 5,5 miljoonaa euroa, vuosittainen tulo on 465 000 euroa ja korkokantana käytetään 8 prosenttia.

$$\mathrm{n} = \frac{-\ln\left(\frac{1}{0{,}08} - \frac{5\,500\,000\,€}{465\,000€}\right) - \ln(0{,}08)}{\ln(1+0{,}08)} = 38\ \mathrm{a} \tag{8}$$

Saadaan takaisinmaksuajaksi 38 vuotta. Tarkastellaan kuvassa 10, kuinka investointikustannuksen suuruus vaikuttaa kaukolämpöakun takaisinmaksuaikaan.




Kuva 10. Kaukolämpöakun investointikustannuksen vaikutus takaisinmaksuaikaan.

# 5 Johtopäätökset

Kaukolämpöakun tilavuuteen vaikuttaa merkittävästi kaukolämpöverkon meno- ja paluulinjojen välinen lämpötilaero. Lämpötilaeroa kasvattamalla pienenee kaukolämpöakun tilavuus merkittävästi, jonka seurauksena myös kaukolämpöakun investointikustannus pienenee. Kaukolämpöakun investointikustannuksen arvioinnissa oli epävarmuuksia jatkuvasti muuttuvien raaka-ainekustannusten vuoksi. Kaukolämpöakun hinta päädyttiin arvioimaan työssä Suomessa lähivuosina valmistuneiden kaukolämpöakkujen investointikustannusten perusteella.

Kaukolämpöakun käytöllä saavutettava taloudellinen hyöty muodostuu kevyen polttoöljyn käytön vähenemisestä ja lisääntyneestä sähköntuotannosta. Korvattaessa öljyä biopolttoaineilla, säästetään polttoaineiden hinnan erotuksessa ja päästöoikeuksien hinnoissa. Excel-simuloinnissa kaukolämpöakun latausta ja lisääntynyttä sähköntuotantoa oli helppo lisätä, kun akun sisältämää lämpöenergiaa pystyi säätämään pidemmällä aikavälillä niin, että kaukolämpöakun lataus tapahtuu silloin, kun sähkön hinta on korkealla. Todellisuudessa kaukolämpöakun latauksen ajankohdan arvioiminen voi olla haastavampaa, jolloin sähköntuotannosta syntyvä tuotto voi vaihdella merkittävästi. Investoinnin kannattavuudessa tulee huomioida myös polttoaineiden hintojen hyvin todennäköinen nousu. Kevyen polttoöljyn hintatrendi on ollut jyrkässä nousussa ylöspäin, mutta myös hakkeen hinta voi nousta saatavuusongelmien ja kovan kysynnän vuoksi. Lisäksi sähkön hinnan vaihtelun yleistyminen vaikuttaa kaukolämpöakun takaisinmaksuaikaan.

Kaukolämpöakun takaisinmaksuaika jäi pitkäksi. Takaisinmaksuaikaan vaikuttaa merkittävästi sähkön tuotannosta syntyvät lisätulot. Laskennassa tuli huomattua, kuinka suuri merkitys kaukolämpöakun käytön optimoinnilla on sen käytöstä syntyvään tuottoon. Kaukolämpöakun lataukseen ja purkuun tulisi kehitellä laskentamenetelmä, joka ottaisi paremmin huomioon sähkön hinnan vaihtelut, jolloin kaukolämpöakun käytön optimointi olisi huomattavasti tehokkaampaa ja saavutettaisiin parempi tulos sähkön myynnistä.

Laskennan perusteena käytetystä tuotantodatasta kävi ilmi, että apukattilaa käytetään kovilla pakkasilla ja Aittaluodon CHP-kattilan huoltoseisakin aikana. Mikäli kaukolämpöakulla

halutaan korvata apukattilan käyttöä, tulisi kaukolämpöakku ladata täyteen leudommilla ilmoilla. Myös ennen seisakkia olisi hyvä ladata akku täyteen, jolloin apukattilaa voisi ajaa pienemmällä teholla ainakin seisakin alussa.

Pori Energian suunnitelma kohti 90 prosenttisesti hiilidioksidipäästötöntä energiantuotantoa vuoden 2024 aikana on joka päivä ajankohtaisempi asia. Lämmön varastoiminen on yksi erinomainen keino lisätä hiilineutraalia energian tuotantoa, sillä se auttaa vähentämään öljyn käyttöä ja sitä kautta alentaa tuotetun lämpöenergian päästökerrointa.

# 6 Yhteenveto

Työssä selvitettiin sopivinta lämmön varastointimenetelmää Pori Energian kaukolämmön runkoverkkoon ja päädyttiin valitsemaan lämpövarastoksi kaukolämpöakku, jossa lämpöenergiaa varastoidaan veteen. Kyseinen menetelmä soveltuu parhaiten ison kokoluokan lämmön lyhytaikaisvarastointiin. Tavoitteena oli myös selvittää, minkä kokoinen kaukolämpöakku olisi hyvä olla Porin runkoverkossa. Kaukolämpöakun lämpökapasiteetti päädyttiin valitsemaan siten, että sen käytöllä voidaan korvata Puuvillan lämpölaitos. Tällöin lämpökapasiteetiksi valittiin 400 MWh ja purku- ja lataustehoiksi 30 MW. Kyseinen kaukolämpöakun lämpökapasiteetti ja purku- ja lataustehot riittävät korvaamaan Puuvillan lämpölaitoksen, mikäli sen käyttö on myös tulevaisuudessa vähäistä. Positiivisena sivuvaikutuksena kaukolämpöakulle löydettiin käyttöä Puuvillan lämpölaitoksen korvaamisen lisäksi myös apukattilan käytön vähentämisessä.

# Lähteet

Aydin, D., Casey, S. P., Riffat, S. 2015. The latest advancements on thermochemical heat storage systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 356–367 s. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2022]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114007308

Energiatehokkuussopimukset. 2019. Etelä-Savon Energia Oy: Sijoitus voimalaitoksen lämpöakkuun kannatti. [Verkkosivusto]. [Viitattu 26.4.2022]. Saatavissa: https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/etela-savon-energia-oy-sijoitus-voimalaitoksen-lampoakkuun-kannatti/

Energiateollisuus. 2022. Kaukolämpötilastot, Energiavuosi 2021 - Kaukolämpö. [Verkkosivusto]. [Viitattu 19.2.2022]. Saatavissa: https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot

Guelpa, E., Verda, V. 2019. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review. Applied Energy. Volume 252. 22 s. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.2.2022]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919311481

Helen. 2022. Kaukolämpölaitteet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.4.2022]. Saatavissa: https://www.helen.fi/lammitys-ja-jaahdytys/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet

Koskelainen, L., Saarela, R., Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus. 566 s. ISBN: 952-5615-08-1.

Motiva. 2021. Kaukolämpö. [Verkkosivusto]. [Viitattu 26.2.2022]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo

Phetteplace, G. E. 2013. District heating guide. Thermal Storage. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Content Provider. ISBN: 978-1-936504-43-5.

Pori Energia. 2019. Pori Energian historia. [Verkkosivusto]. [Viitattu 19.2.2022]. Saatavissa: https://www.porienergia.fi/yritys/Historiaa

Pori Energia. 2022a. Toimintakertomus Vuosi 2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.4.2022]. Saatavissa: https://www.porienergia.fi/globalassets/vuosiraportit/vuosiraportit-2021/porienergia_toimintakertomus_2021.pdf

Pori Energia. 2022b. YMPÄRISTÖ & YHTEISKUNTAVASTUU. [Verkkosivusto]. [Viitattu 10.2.2022]. Saatavissa: https://www.porienergia.fi/yritys/Ymparisto

Satakunnan Kansa. 2022. Poriin suunnitteilla ”ympäristötaikatemppu” hiilidioksidipäästöille. [Verkkosivusto]. [Viitattu 3.5.2022]. Saatavilla: https://www.satakunnankansa.fi/satakunta/art-2000008764213.html

SteelBenchmarker. 2022. Price History Tables and Charts. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.4.2022]. Saatavissa: http://steelbenchmarker.com/history.pdf

Streckiene, G., Martinaitis, V., Andersen, A., Katz, J. 2009. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market. Applied Energy. Volume 86, Issue 11, 2308–2316 s. ISSN 0306-2619. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.4.2022]. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909001147

Sähköviesti. 2021. Kaukolämpöakku tuottanut miljoonan jo ensimmäisenä vuonna. [Verkkosivusto]. [Viitattu 26.4.2022]. Saatavissa: https://www.sahkoviesti.fi/paikalliset/kaukolampoakku-tuottanut-miljoonan-jo-ensimmaisena-vuonna.html

Tilastokeskus. 2022a. Polttonesteiden kuluttajahinnat. [Verkkosivusto]. [Viitattu 14.4.2022]. Saatavissa: https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ene__ehi/statfin_ehi_pxt_12ge.px/

Tilastokeskus. 2022b. Polttoaineluokitus 2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 29.3.2022]. Saatavissa: https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html

Tilastokeskus. 2022c. Kotimaisten polttoaineiden käyttäjähinnat energiantuotannossa (ei sis. alv). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.4.2022]. Saatavissa: https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_12gb.px/table/tableViewLayout1/

Trading Economics. 2022. Steel Rebar futures. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.5.2022]. Saatavissa: https://tradingeconomics.com/commodity/steel

Liite 1. Excel-simuloinnissa käytetyt yhtälöt.

Latauskapasiteetti = JOS(JOS((80- A-kattilan teho)*0,65>30;30;(80- A-kattilan teho)*0,65)<0;0;JOS((80- A-kattilan teho)*0,65>30;30;(80- A-kattilan teho)*0,65))

80 on kattilan polttoaineteho [MWh], 30 on maksimi latausteho [MW] ja 0,65 on 1 - rakennusaste.

Akun sisältämä lämpöenergia = JOS(JOS((Akun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta - lämpöhäviö - kaukolämpö Puuvillan lämpölaitokselta + latauskapasiteetti - apukattilan käyttö - KL-akusta KL-verkkoon purettu lämpöenergia)>=400;400;(Akun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta - lämpöhäviö - kaukolämpö Puuvillan lämpölaitokselta + latauskapasiteetti - Apukattilan käyttö - KL-akusta KL-verkkoon purettu lämpöenergia))<=0;0;JOS((Akun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta - lämpöhäviö - kaukolämpö Puuvillan lämpölaitokselta + latauskapasiteetti - Apukattilan käyttö - KL-akusta KL-verkkoon purettu lämpöenergia)>=400;400;(Akun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta - lämpöhäviö - kaukolämpö Puuvillan lämpölaitokselta + latauskapasiteetti - Apukattilan käyttö - KL-akusta KL-verkkoon purettu lämpöenergia)))

400 on kaukolämpöakun maksimi lämpökapasiteetti [MWh].

Kaukolämpöakun lataus (tai purku, jos negatiivinen etumerkki) =JOS(Kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia - Kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta <Latauskapasiteetti; Kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia - Kaukolämpöakun sisältämä lämpöenergia edelliseltä tunnilta; Latauskapasiteetti)

Sähkön tuotannon mahdollinen lisäkapasiteetti =JOS(Lataus<=0;0;JOS(sähkö-teho<=0;0;JOS((0,35*sähköteho)+turbiinin teho>15,624;15,624-turbiinin teho;(0,35*sähköteho))))

15,624 on turbiinin maksimiteho [MW] ja 0,35 on rakennusaste.

Lisätulot sähkön myynnistä = Sähkön tuotannon mahdollinen lisäkapasiteetti * Sähkön tuntikohtainen Spot-hinta