



Datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa

Risto Roponen

Opinnäytetyö, AMK

Joulukuu 2025

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

Roponen Risto

Datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotannossa

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. **Joulukuu 2025**, 46 sivua.

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Sähköisen infrastruktuurin kapasiteetin kasvu tuottaa lisääntyvän energiankulutuksen myötä hukkalämpöä, jota hyödyntämällä voidaan parantaa muun muassa kaukolämmön tuotannon energiatehokkuutta. Saarijärven Kaukolämpö Oy:n toimeksiannossa selvitettiin, miten datakeskuksen jatkuvalla 1,6 MW nimellisteholla tuotetulla lämmöllä voidaan korvata teknisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestäväällä tavalla perinteiseen polttotekniikkaan perustuvaa tuotantoa erityisesti kesäkaudella.

Toimintatutkimuksellisessa työssä yhdisteltiin laadullisia ja määrällisiä menetelmiä hyödyntäen pääasiallisena aineistona toimeksiantajan kirjallista materiaalia ja empiiristä kulutusdataa. Kaukolämpöverkon paluupuolelle integroitavan hukkalämmön teknistä toimivuutta arvioitiin toimitusvarmuuden ja talousveden laatuvaatimuksista annetun asetuksen edellyttämän priimauksen tarpeen osalta. Taloudellista kannattavuutta tarkasteltiin investointikustannusten ja takaisinmaksuajan avulla.

Hukkalämmön arvioitiin vastaavan noin 37 % vuoden 2024 kokonaistuotannosta. Kesäkaudella se kattaisi suuren osan lämmöntarpeesta ja toimisi talvikaudella tehokkaana pohjakuorman tuottajana. Investointi todettiin kannattavaksi vuotuisten tuotantokustannusten pienentyessä polttoaineiden osalta noin 11 % ja hiili-dioksidipäästöjen noin 50 %. Polttavaan tuotantoon verrattuna investoinnin arvioidut kokonaissäästöt ovat noin 22 % ja takaisinmaksuaika pelkillä lämmöntuotannon säästöillä noin 8 vuotta.

Taloudellisesti kannattavaksi, teknisesti toteuttamiskelpoiseksi ja ympäristön kannalta erittäin positiiviseksi todettu hukkalämpöhanke olisi toimeksiantajalle valtava harppaus kohti vähäpäästöisempää tuotantoa. Jos se otetaan, sitä seuraava askel voisi käydä kohti lämpöpumpputeknologian hyödyntämistä priimauksessa.

Avainsanat (asiasanat)

Datakeskus, hukkalämpö, kaukolämpöjärjestelmä

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liite 1 on salassa pidettävä, ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon perusteet ovat Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17 ja 21, yrityksen liike- tai ammatillisalaisuus. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta, salassapito päättyy 6.2.2035

Roponen, Risto

Utilization of waste heat from data center in district heating production

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, December 2025, 46 pages.

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

With the increasing capacity of the electrical infrastructure, growing energy consumption generates waste heat that can be utilized to improve, among other things, the energy efficiency of district heating production. This thesis, commissioned by Saarijärven Kaukolämpö Oy, investigated how 1.6 MW of continuous nominal heat output from a data center could technically, economically, and ecologically sustainably substitute production based on traditional combustion technology, especially during the summer season.

The action research approach combined qualitative and quantitative methods, primarily utilizing the client's written materials and empirical consumption data. The technical feasibility of integrating the waste heat into the district heating network's return pipe was assessed concerning reliability of delivery and the need for topping-up heat (priimaus) as required by the regulations on domestic water quality. Economic viability was examined based on investment costs and the payback period.

The waste heat was estimated to cover approximately 37 % of the total production for 2024. It would cover a substantial portion of the heat demand during the summer and serve as an efficient base load producer during the winter. The investment was deemed profitable, with annual production costs for fuels decreasing by approximately 11 % and carbon dioxide emissions by about 50 %. Compared to combustion-based production, the estimated total savings from the investment are about 22 %, with a payback period based on heat production savings alone is approximately 8 years.

The waste heat project, concluded to be economically viable, technically feasible, and highly positive for the environment, would represent a significant stride toward lower-emission production for the client. If implemented, the subsequent step could involve leveraging heat pump technology for topping-up to further enhance energy efficiency

Keywords/tags (subjects)

Data center, waste heat, district heating system

Miscellaneous (Confidential information)

Appendix 1 is confidential and has been removed from the public record. The grounds for confidentiality are sections 17 and 21 of Article 24 of the Publicity Act 621/1999, concerning business or professional secrets. The confidentiality period is ten (10) years, ending on 6.2.2035.

Sisältö

1	Johdanto	3
2	Toimeksianto.....	4
2.1	Toimeksiantaja	5
2.2	Datakeskuksen toimittaja.....	6
3	Tutkimusasetelma ja -menetelmä	7
3.1	Aineiston keruu ja analyysi.....	8
3.2	Tutkimusmenetelmä	8
3.3	Eettisyys.....	9
4	Kaukolämpö ja sen yleisesittely	9
4.1	Lämmitysmuotona	9
4.2	Kaukolämmön historiaa	10
5	Kaukolämmön tuotanto ja varastointi.....	14
5.1	Polttavat menetelmät	14
5.1.1	Arinapoltto.....	15
5.1.2	Leijupoltto.....	16
5.1.3	Öljykattilat.....	18
5.2	Sähkökattilat.....	19
5.3	Lämmön talteenotto (LTO).....	20
5.4	Kaukolämpöakku	21
6	Kaukolämmön siirto.....	22
7	Datakeskus: tekninen toteutus ja kytkentä	26
7.1	Virheenkesto	28
7.2	Tuotannon määrä ja kulutustrendit	28
8	Kustannusvaikutukset.....	32
9	Ympäristövaikutukset	33
10	Tulosten tarkastelu ja työn eettisyys	36
11	Pohdinta ja jatkokehitys	38
	Lähteet	40
	Liitteet	43
	Liite 1. Ympäristö- ja kustannusvaikutukset (Salassa pidettävä)	43
	Kuviot	
	Kuvio 1. Öljykattilan tulipinnat (Roponen 2025).	19

Kuvio 2. Talojohdon asennustyömaa (Roponen 2023)	22
Kuvio 3. Kaukolämmön kuukausikäyttö 2024 (Kaukolämpövuosi 2024, 2025).....	26
Kuvio 4. Datakeskuksen kytkentä	27
Kuvio 5. KPA 2:n meno- ja paluueden lämpötila.....	29
Kuvio 6. KPA 2 tehokäyrä	30
Kuvio 7. KPA 1 tehokäyrä	30
Kuvio 8. KPA-laitosten tehokäyrät	31
Kuvio 9. Tehokäyrät KPA 2 ja datakeskus	32
Kuvio 10. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötila.....	32

Taulukot

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuuksia (Tilastokeskus 2025)	34
Taulukko 2. Tuotantomäärät ja päästöt 2023	35

1 Johdanto

Sähköisten palveluiden levittäytyessä yhä useammille tietoyhteiskunnan aloille ja etenkin tekoälyn kaltaisten suurta laskentatehoa vaativien palveluiden yleistyessä, niiden perustana olevan digitaalisen infrastruktuurin kapasiteettia on jatkuvasti kasvatettava. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi päivittämällä käytettäviä laitteita tehokkaammiksi, tai perustamalla kokonaan uusia datakeskuksia sinne missä data liikkuu. Parempien tietojenkäsittelyresurssien varjopuolena näyttäytyy kuitenkin lisääntyvä energiankulutus ja erityisesti siitä syntyvä hukkalämpö.

Uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä annetun EU-direktiivin mukaan hukkalämpöä on esimerkiksi datakeskuksissa väistämättä syntyvä lämpö, joka käyttämättömänä katoaisi ilmaan tai veteen (Direktiivi 2018/2001/EU 2018). Vuonna 2020 tehdyn tutkimuksen mukaan n. 46 % datakeskuksen käyttämästä energiasta muuttuikin hukkalämmöksi, jota voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi kaukolämmön tuotannossa (Rämä & Klobut 2020).

Datakeskusten hukkalämmön hyödyntäminen onkin yleistynyt trendi, ja useissa suurissa kaupungeissa on jo otettukin käyttöön ratkaisuja, joissa palvelinkeskusten tuottamaa lämpöä siirretään kaukolämpöverkkoon (Datakeskuksen hukkalämmöissä 2023). Tämä tutkimus selvitti, kuinka vastaava konsepti voidaan toteuttaa Saarijärven mittakaavassa ja kuinka kannattavaa se paikallisesti tehtynä on.

Opinnäytetyössä selvitettiin, miten datakeskuksen hukkalämpöä voidaan teknisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestäväällä tavalla hyödyntää Saarijärven kaukolämpöverkossa. Työn toimeksiantajana toimi Saarijärven Kaukolämpö Oy, jonka pilottihanke pyrki hukkalämpöä hyödyntämällä parantamaan kaukolämmön energiatehokkuutta ja vähentämään perinteiseen polttotekniikkaan perustuvaa tuotantoa erityisesti kesäkaudella, jolloin lämmöntarve on pienempää ja uusiutuvien energialähteiden hyödyntämismahdollisuudet suuremmat.

Tämä opinnäytetyö tukee työelämän kehittämistä nostamalla esiin näkökohtia, joita on hyvä pohdita hukkalämpöä hyödynnettäessä ja esittelemällä niihin liittyviä konkreettisia toimenpiteitä sekä tapoja, joilla kaukolämpöverkkoja voidaan kehittää kohti energiatehokkaampaa ja vähäpäästöisempää tulevaisuutta. Aiheeltaan työ sivuaa laajasti energiapolitiikkaa ja kestäväen kehityksen tavoitteita, koska sekä Euroopan unionin ilmastopolitiikka, että Suomen hiilineutraaliustavoitteet

kannustavat hyödyntämään jo olemassa olevaa energiaa mahdollisimman tehokkaasti (Sopimus n.d).

2 Toimeksianto

Kaukolämmön tarve on talvikuukausina moninkertaista verrattuna kesään, joten ylitarjonnan välttämiseksi sen tuotantoa on lämpiminä aikoina järkevää rajoittaa (Kaukolämpö 2025). Saarijärven Kaukolämpö Oy:n perinteisiin polttaviin tekniikoihin perustuvan tuotannon kannalta tämä merkitsee kuitenkin laitoksen toistuvaa ylös- ja alasajoa, mikä lisää sekä huollon tarvetta että ympäristökuormitusta. Tämän vuoksi se on käynnistänyt pilottihankkeen, jossa selvitetään datakeskuksen tuottaman hukkalämmön hyödyntämistä kaukolämpöverkon lämmönlähteenä. Hanke edistää myös laajempaa kestävä kehityksen tavoitetta, jossa pyritään parantamaan energiatehokkuutta ja vähentämään polttoaineiden käyttöä kaukolämmön tuotannossa.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin, miten datakeskuksen hukkalämpöä voi hyödyntää kaukolämmön tuotannossa luotettavasti ja kustannustehokkaasti. Asiaa tarkasteltiin kolmesta toimeksiantajan hyväksymästä näkökulmasta: tekninen toimivuus, taloudellinen kannattavuus ja ympäristövaikutukset.

Työn tavoitteena oli vastata seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten hukkalämmöllä voidaan vastata kausittain vaihtuvaan kysyntään?
- Kuinka kannattavaa investointi hukkalämmön käyttöön on?
- Mitä hyötyjä hukkalämmön käytöstä on ympäristön kannalta?

Työn tarkastelu rajattiin koskemaan hukkalämmön hyödyntämistä Saarijärven kaukolämpöverkostossa. Datakeskuksen osalta työ rajattiin verkostoon tulevaan hukkalämpöön, joten sen tuotantotapa jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Työ rajattiin siten, että se antaa toimeksiantajalle hyvin taustoitettuja konkreettisia laskelmia ja arvioita asioista, joihin se voi omilla päätöksillään vaikuttaa. Laajemmat yhteiskunnalliset vaikutukset, kuten energiaverotus, päästökauppa tai muut sääntelyyn liittyvät näkökulmat, jätettiin siis suosiolla tämän työn ulkopuolelle.

Työn kannalta keskeisiä käsitteitä ovat:

Hukkalämpö: Datakeskuksessa syntyvä ylimääräinen lämpö.

Kaukolämpöverkko: Lämmöntoimitusjärjestelmä, jonka avulla lämpö siirretään lämmöntuottopaikasta asiakkaille.

Tekninen toimivuus: Datakeskuksen lämmöntuotannon toimitusvarmuus ja sen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa.

Taloudellinen kannattavuus: Investointikustannukset, takaisinmaksuaika ja säästöt.

Ympäristövaikutukset: Polttoaineiden käytön vähentäminen ja siitä johtuva ympäristöpäästöjen väheneminen.

Työn tuloksena toimeksiantaja sai arvion datakeskuksen hukkalämmön riittävydestä kulutustrendien perusteella, laskelmat hankkeen taloudellisesta kannattavuudesta investointikustannusten, takaisinmaksuajan ja säästöjen kannalta ja selvityksen ympäristövaikutuksista etenkin CO₂-päästöjen ja energiantuotannon kestävyuden kannalta. Lisäksi työssä nostettiin esille mahdollisia riskitekijöitä ja keinoja niihin varautumiseen. Työn tulokset hyödyttävät toimeksiantajaa tarjoamalla konkreettiset laskelmat ja selvitykset päätöksenteon tueksi.

2.1 Toimeksiantaja

Saarijärven Kaukolämpö Oy on pohjoisessa Keski-Suomessa sijaitsevan Saarijärven kaupungin kokonaan omistama kaukolämpöä tuottava yritys. Se aloitti toimintansa vuonna 1961 ja työllistää nykyään vakituisesti viisi henkilöä. Vuonna 2024 yrityksellä oli 209 asiakasta ja liikevaihtoa 2,06 miljoonaa euroa. (Saarijärven Kaukolämpö Oy, 2025)

Yrityksellä on viisi lämpökeskusta, joista kolme on kiinteän polttoaineen ns. KPA-laitoksia. Sen reilusti yli 24 km mittaista kaukolämpöverkostoa pitkin toimitetaan ympäristöystävällistä lämpöenergiaa vuosittain liki 32 GWh. Saarijärven Kaukolämpö Oy hyödyntää lähes yksinomaan kotimaisia polttoaineita, joiden osuus on viime vuosina ollut n. 95—99 %. (Mt.)

Yrityksen toiminta-ajatuksena on toimittaa kaukolämpöä luotettavasti ja kustannustehokkaasti niin yksityis- kuin yritysasiakkaille lähienergiaa hyödyntäen, ympäristöä ja turvallisuutta unohtamatta. Energiaa käytetään lämmittämään niin käyttövetä kuin asiakkaiden tilojakin. Maininnan arvoista onkin, että lämmitettävää rakennusala löytyy jo 857 000 m³. (Mt.)

Hintavakaan kaukolämmön tuottamiseen tähtäävä yritys panostaa paikallisuuden lisäksi myös ympäristöystävällisyyteen, minkä ansiosta sen lämpölaitosten savukaasujen hiukkaspitoisuudet alittavat Eurofins-laboratorion tekemien mittausten perusteella päästöraja-arvon reilusti. (Yritys n.d.)

2.2 Datakeskuksen toimittaja

EDDU Energy on ranskalainen teknologiayritys, joka keskittyy hyödyntämättömän ja ylijäämäenergian muuntamiseen digitaaliseksi laskentatehoksi ja lämpöenergiaksi. Yrityksen toimitusjohtajana toimii Edouard Dubrana, ja sen pääkonttori sijaitsee Toulousessa, Ranskassa. (EDDU Energy n.d.)

EDDU Energy tarjoaa siirrettäviä ja skaalautuvia konttirakenteisia infrastruktuuriratkaisuja, jotka hyödyntävät puhdasta ja ylijäämäenergiaa. Näitä ratkaisuja käytetään muun muassa datakeskusten energiansyötössä, verkon tasapainottamisessa ja voimalaitosten optimoinnissa. Yrityksen datakeskukset on suunniteltu erittäin energiatehokkaiksi, ja ne hyödyntävät jopa 95 % palvelimien tuottamasta hukkalämmöstä esimerkiksi kaukolämmitykseen ja maatalouden tarpeisiin. (Mt.)

Saarijärven hukkalämpöprojektiin liittyviin tiedusteluihin EDDU Energyn toimitusjohtaja Edouard Dubrana (2025) vastasi sähköpostitse. Hän kertoo Suomen ja erityisesti Saarijärven valinnan datakeskuksen sijoituspaikaksi olleen strateginen. Suomi tarjoaa kilpailukykyistä ja vihreää sähköä, erittäin luotettavan sähköverkon sekä vakaat poliittiset olosuhteet, jotka tukevat teknologisia innovaatioita. Saarijärvi valikoitui erityisesti siksi, että siellä on jo olemassa oleva kaukolämpöverkko, jota operoiva paikallinen energiayhtiö on sitoutunut siirtymään kohti vähähiilistä tuotantoa. Hyvät yhteistyösuhteet Saarijärven Kaukolämmön johdon kanssa vahvistivat paikkavalintaa entisestään. Kyseessä on EDDU Energyllä merkittävä pilottihanke, joka toimii esimerkkinä yhtiön strategiasta yhdistää digitaaliset palvelut ja energiantuotannon hiilineutraalisuus. (Dubrana 2025.)

Viestissään Dubrana painottaa myös hankkeen teknistä ja taloudellista merkitystä. Tämä on heidän ensimmäinen hankkeensa, jossa datakeskuksen hukkalämpö saadaan konkreettisesti käyttöön osana kaukolämpöä. Teknisesti suurin haaste on ollut varmistaa, että datakeskuksesta saatava lämpö vastaa verkon vaatimuksia erityisesti korkeiden lämpötilojen osalta myös talvella. Lainsäädäntö on ollut hankkeelle pääosin suotuisaa, mutta suunnitteilla oleva sähköveroluokan 2 poistaminen voisi tulevaisuudessa vaikeuttaa datakeskusten taloudellista kannattavuutta Suomessa. Dubrana toivookin, että jatkossa lainsäätäjät erottelisivat ympäristöä tukevat keskuskeskukset niistä, jotka eivät osallistu puhtaaseen energiasiirtymään. Lopuksi hän näkee hankkeessa potentiaalia laajempaan eurooppalaiseen käyttöön ja toivoo EDDU Energylle pitkäaikaista yhteistyötä Saarijärven kanssa. (Mt.)

3 Tutkimusasetelma ja -menetelmä

Työssä analysoitiin teknisen toimivuuden näkökulmasta, kuinka datakeskuksen hukkalämpö integroidaan osaksi olemassa olevaa kaukolämpöinfrastruktuuria, ja miten lämpöenergian toimitusvarmuus sekä lämmöntuotannon riittävyys varmistetaan eri tilanteissa. Samalla tunnistettiin hukkalämmön hyödyntämiseen liittyviä riskejä, ja etsittiin keinoja varautua niihin. Lämmön riittävyttä selvitettiin kulutustietojen ja -trendien perusteella, ja priimauksen ja varavoiman tarvetta arvioitiin myös riskienhallinnan näkökulmasta. Kulutustietoja analysoimalla arvioitiin hukkalämmön riittävyttä eri tilanteissa, ja selvitettiin sähkökattilan ja muiden varavoimaratkaisujen tarvetta täydennyksenä kulutuspiikkien aikana.

Taloudellisesta näkökulmasta tarkasteltiin investointi- ja käyttökustannuksia, sekä hankkeen kannattavuutta mm. takaisinmaksuajan avulla. Kaukolämmön nykyisen ja suunnitellun tuotannon kannattavuutta vertailtiin mm. tuotantokustannusten ja kausivaihteluiden sekä mahdollisen lisälämmitystarpeen osalta. Työssä selvitettiin nykyisen ja suunnitellun tuotantotavan yksikkökustannukset (€/MWh) polttoaine-, käyttö-, hankinta- ja ylläpitokustannukset huomioiden, sekä mallinnettiin nykyisen ja suunnitellun tuotantotavan kokonaiskustannuksia eri skenaarioissa.

Ympäristövaikutusten näkökulmasta selvitettiin hukkalämmön hyödyntämisen vaikutusta kaukolämmön tuotannon ekologiseen kestävyys ja CO₂-päästöihin. Päästövaikutuksissa huomioitiin polttoaineiden tarpeen vähentyminen hukkalämmön käytön seurauksena, ja ekologista kestävyttä arvioitiin lähiympäristön kannalta.

3.1 Aineiston keruu ja analyysi

Tutkimusaineisto koostui pääosin toimeksiantajan kirjallisesta materiaalista (sopimukset, tekniset dokumentit, hinnastot ym.) ja empiirisestä datasta (kulutustiedot, mittaukset, simulaatiot ym.). Tätä määrällistä taulukko- ja mittausdataa täydennettiin laadullisin menetelmin kerätyillä omilla havainnoilla ja asiantuntijahaastatteluilla, sekä muiden toimijoiden vastaavanlaisista ratkaisuista saaduilla kokemuksilla.

3.2 Tutkimusmenetelmä

Opinnäytetyö perustui toimintatutkimukselliseen lähestymistapaan, jossa hyödynnettiin sekä laadullisia että määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Tietopohjana käytettiin alan kirjallisuutta, asiantuntijahaastatteluja, kaukolämmön kulutusdataa sekä vertailua vastaaviin hankkeisiin.

Toimeksiantaja oli tuottanut lämpöä aina polttamalla, joten datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen tulee vaatimaan muutoksia perinteisiin toimintatapoihin polttoaineiden hankinnasta kulutusennusteiden laatimiseen. Opinnäytteessä käytettiin toimintatutkimusta, joka Kanasen (2014, 13) mukaan on kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia tutkimusmenetelmiä yhdistävä tutkimusstrategia, jonka avulla hankitaan tietoa ilmiöstä muutoksen toteuttamiseksi.

Toimintatutkimus pyrkii aikaansaamaan muutoksen, joten ensin on tunnettava muutettava ilmiö ja selvitettävä siihen vaikuttavat tekijät (mts. 12). Tässä opinnäytteessä kehitettiin kaukolämmön tuotantoprosessia siten, että siinä hyödynnetään datakeskuksen hukkalämpöä. Prosessiin vaikuttavia tekijöitä olivat mm. lämmön tuotantotavat ja lämmöntarve.

Koska muutosten laajuutta ei voinut tietää heti alussa, oli parannuksia tehtävä pienin askelin, ja varauduttava ratkomaan eteen tulevia uusia ongelmia. Toimintatutkimus sopi tähän varsin hyvin. Kananen (2014, 12) nimittäin toteaa, että toimintatutkimus on tutkimusta sisältävä sykleistä muodostuva prosessi, jossa suunnittelua seuraa toimeenpano, havainnointi ja reflektointi. Uusi sykli jatkuu siitä mihin edellinen jäi, tai keskittyy poistamaan vastaan tulleita uusia ongelmia.

Toimintatutkimus on melko lähellä kehittämistutkimusta, mutta eroaa Kanasen (2014, 20) mukaan siitä siten, että toimintatutkimuksessa tutkija on itse mukana muutoksessa. Perna (2013) katsoo

puolestaan eroksi sen, tavoitellaanko paikallisesti toimivaa ratkaisua vai pyritäänkö se yleistämään. Tässä opinnäytteessä riitti paikallinen ratkaisu, mikä poissulki kehittämistutkimuksen käytön.

3.3 Eettisyys

Tässä opinnäytetyössä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä, sekä JAMKin opinnäytetyöohjeistusta tutkimuksen luotettavuuden ja eettisyyden varmistamiseksi. Kaikki käytettävät lähteet olivat ajantasaisia ja perustuivat luotettavaan tutkimustietoon, kuten viimeisimpiin opinnäytetöihin, tieteellisiin artikkeleihin ja alan raportteihin.

Tutkimuksessa ei kerätty henkilötietoja. Kaikki hankkeeseen liittyvä aineisto käsiteltiin huolellisesti ja tietoturvasääntöjen mukaisesti mahdollisten salassapitosopimusten mukaisesti. Lähteet merkittiin asianmukaisesti, ja tutkimustulokset raportoitiin objektiivisesti ja läpinäkyvästi.

Opinnäytetyön päätyttyä aineistoa käsiteltiin JAMKin ohjeistuksen mukaisesti.

4 Kaukolämpö ja sen yleisesittely

Tämä luku keskittyy kaukolämmön periaatteisiin, sen asemaan lämmitysmuotona ja historialliseen kehitykseen. Lisäksi tarkastellaan Saarijärven kaukolämpöverkkoa ja sen erityispiirteitä. Lukijalle luodaan kokonaiskuva kaukolämmöstä ja sen merkityksestä osana kestäväää energiantuotantoa.

4.1 Lämmitysmuotona

Kaukolämpö on keskitetty energian tuotanto- ja jakelujärjestelmä, jota käytetään ensisijaisesti rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen. Keskitetty tuotantotapa mahdollistaa energiatehokkuuden optimoinnin, sillä suurissa polttolaitoksissa voidaan hyödyntää monipuolisesti myös laadultaan vaihtelevaa biomassaa ja muuta polttoainetta, jota pienissä yksiköissä ei ole mahdollista käyttää. Keskitetyn tuotannon ansiosta päästöjen hallintakin on kustannustehokasta, koska suuret laitokset pystyvät investoimaan kehittyneisiin suodatus- ja puhdistusratkaisuihin, mikä vähentää ilman epäpuhtauksia ja ympäristökuormitusta. (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 25–27.)

Tällä hetkellä kaukolämmön tuotanto perustuu pääosin polttotekniikkaan, joka on pitkäaikaisen kokemuksen perusteella osoittautunut toimintavarmaksi ja teknisesti hyvin optimoiduksi menetelmäksi. Polttotekniikkaan erikoistuneet laitokset pystyvät huolehtimaan polttoaineen hankinnasta ja varastoinnista suunnitelmallisesti, mikä takaa energiantuotannon jatkuvuuden ja käyttövarmuuden huomattavasti paremmin kuin tilanteessa, jossa esimerkiksi haketta tai muita biopolttoaineita jouduttaisiin varastoimaan ja polttamaan yksittäisten asuinrakennusten tai muiden käyttöpaikkojen lähellä. Keskitetyn tuotannon varajärjestelmät, kuten lämpöakut tai sähkökattilat, mahdollistavat lisäksi häiriöttömän lämmöntuotannon myös kysynnän vaihteluista huolimatta. (Mts. 26, 274–275.)

Toimivuudestaan huolimatta polttoperusteisesta kaukolämmöntuotannosta pyritään nykyään asteittain luopumaan, sillä kansainväliset ja kansalliset säädökset sekä ilmastotavoitteet ohjaavat energiantuotantoa kohti vähäpäästöisempiä ratkaisuja. Tämä on lisännyt kiinnostusta muun muassa hukkalämmön hyödyntämiseen, lämpöpumpputeknologiaan ja uusiutuvien energiamuotojen integrointiin osaksi kaukolämpöverkkoja. (Mts. 28.)

4.2 Kaukolämmön historiaa

Vaikka kaukolämmön historiassa on perinteisesti korostettu sen juontavan juurensa muinaisesta antiikista, uudemman historiantutkimuksen mukaan Rooman kylpylöitä ja varakkaiden kansalaisten koteja lämmittänyttä uunista lämmintä ilmaa lattian alle johtanutta hypokaustia edelsikin jo tuhansia vuosia aiemmin vastaavanlainen aasialainen kang-järjestelmä. (Bean, Olesen, Kwang & Kim 2010.) Ensimmäinen varsinaisesti dokumentoitu kaukolämpöjärjestelmä otettiin kuitenkin käyttöön Ranskassa vuonna 1332, kun Chaudes-Aiguesissa johdettiin kuumien lähteiden vettä puuputkissa taloja lämmittämään (Danish Board of District Heating 2022; Geothermal-DHC 2021). Kyseinen järjestelmä hoitaa edelleenkin yli sadan talon lämmityksen.

Muita varhaisia ehdotuksia ja järjestelmiä ovat esimerkiksi hollantilaisen keksijän Cornelius Drebbelin Lontoota varten vuonna 1623 suunnittelema kaukolämpöhanke, sekä Benjamin Franklinin vuonna 1749 tekemä ehdotus rivitalojen lämmittämiseksi keskitetyllä lämmitysratkaisulla (Pierce 2025). Vaikka nämä suunnitelmat eivät heti toteutuneetkaan, ne osoittavat jatkuvaa kiinnostusta ja ymmärrystä kaukolämmön potentiaalista jo ennen sen kaupallista menestystä. Yhdysvalloissa otettiin ennen vuotta 1877 käyttöön joitakin teollisia ja institutionaalisia kaukolämpöjärjestelmiä,

esimerkiksi Yhdysvaltain laivastoakatemiassa Annapolisissa vuonna 1853 (Pierce 2025). Nämä varhaiset järjestelmät loivat pohjaa kaukolämmön laajempaan kaupalliseen hyödyntämiseen.

Ensimmäisen kaupallisesti menestyneen kaukolämpöjärjestelmän perusti yhdysvaltalainen Birdsill Holly Lockportiin, New Yorkiin, vuonna 1877. Häntä pidetään laajalti modernin kaukolämmön perustajana, koska hänen järjestelmänsä osoittautui kaupallisesti elinkelpoiseksi ja johti myöhemmin laajaan käyttöönottoon. Holly tunnettiin toiminnastaan vesihydrauliikkalaitteiden parissa esimerkiksi palopostin parantelijana, ja kokemus vedenjakelujärjestelmistä todennäköisesti vaikuttikin hänen ideoihinsa höyryn jakelusta lämmitykseen. (Collins 1959.)

Hollya motivoi halu löytää tehokkaampi tapa lämmittää useita rakennuksia sen sijaan, että jokaisessa rakennuksessa olisi oma erillinen lämmityskattila. Tämä korostaa kaukolämmön perimmäistä tavoitetta parantaa energiatehokkuutta ja mahdollisesti alentaa kustannuksia. Vuonna 1876 Holly rakensi kotiinsa Lockportissa kokeellisen maanalaisia putkia käyttävän höyrylämmitysjärjestelmän testatakseen ideaansa ennen sen kaupallistamista. Onnistumisen myötä hän perusti seuraavana vuonna Holly Steam Combination Companyn, jonka tavoitteena oli kaupallistaa keskitetty lämmönjakelu ja tuottaa kaukolämpöä kaupunkeihin Yhdysvalloissa ja Kanadassa. (The Holly Steam Combination Company 1878.)

Hollyn järjestelmässä suuri keskuslämmityskattila tuotti höyryä, joka johdettiin kohtalaisessa paineessa eristettyjen putkien verkoston kautta ympäröivien kaupunginosien rakennuksiin, ja kondensoitunut vesi palautettiin takaisin. Jokaisen asiakkaan kulutus mitattiin Hollyn kehittämällä höyryn määrän mittarilla, ja asiakkaita laskutettiin kulutetun lämmön mukaan (The Holly Steam Combination Company 1878, 18). Tämän järjestelmän keskeiset elementit olivat keskitetty tuotanto, eristetty jakelu ja mitattu kulutus. Ne ovat edelleen kaukolämmön peruseriaatteita. Holly suunnitteli ja patentoi kaikki tarvittavat säätimet ja mittauslaitteet kaupunginosan lämmitysjärjestelmän toimintaa varten ja hänelle myönnettiin elämänsä aikana 150 patenttia.

Hollyn keksintö saavutti nopeasti suosiota ja kaukolämpöverkostoja alettiin rakentaa vauhdilla. American District Steam Company perustettiin vuonna 1881 (Pierce 2025) ja Manhattania nykyäänkin lämmittävä New York Steam Company vuonna 1882 (Danish Board of District Heating 2022). Eurooppaan kaukolämpölaitokset rantautuivat vasta 1900-luvun taitteessa Saksan saadessa

oman laitoksensa Hampuriin vuonna 1893. Kyseessä oli lämpöä ja sähköä tuottava yhteistuotantolaitos (CHP, Cogeneration of Heat and Power), joka sähkön lisäksi tuotti lämpöenergiaa läheiselle kaupungintalolle.

Tanskan ensimmäinen kaukolämpölaitos valmistui Fredriksbergiin vuonna 1909 ja pääkaupunki Kööpenhaminan vuonna 1925. Venäjä pääsi kaukolämmön piiriin Pietarin laitoksen myötä vuonna 1924, ja Moskovakin sai omansa vuonna 1928. 1900-luvun taite onkin aikaa, jolloin Euroopan kaukolämpöinfrastruktuuri otti kunnolla tuulta siipiensä alle.

Suomen maakunnissa Saarijärvellä 1960-luvun alussa aloitettu kaukolämpöhanke oli yksi ensimmäisistä, jääden vain joitakin vuosia Helsingistä jälkeen (Hänninen 1991, 3). Kun maatalousnäytteen valmistelut olivat täydessä vauhdissa, oli saarijärveläisillä intoa lähteä kokeilemaan kaukolämmönkin kaltaisia uusia ja merkittäviä asioita. (Mts. 5.)

Lämpökeskuksen rakennustyöt Myllyperällä alkoivat 4.9.1961 ja sujuivat nopeasti. Kattilan ja kanavaputkiston hitsausseamat todettiin korkeatasoisiksi, joten talvikaudella koivuhalkoa kalliimman hakkeen sijaan polttanut kaukolämpölaitos saatiin toimintaan ilman viivästyksiä 30.12.1961. (Mts. 10–11.) Sen seurauksena kaukolämpö alkoi saada jalansijaa myös muissa Saarijärven esimerkistä innostuneissa Suomen kunnissa. (Mts. 12.)

Varhaisissa kaukolämpöjärjestelmissä polttoaineena käytettiin usein hiiltä ja yhdyskuntajätettä, mikä ratkaisi samalla sekä lämmitystarpeen että jätteen hävittämisen, mikä varhaisena kiertotalouden esimerkkinä edisti todennäköisesti osaltaan kaukolämmön alkuaikojen suosiota. Aikojen kuluessa kaukolämpöteknologiat ovat sittemmin kehittyneet merkittävästi useiden sukupolvien aikana.

Ensimmäinen sukupolvi (1800-luvun loppu – 1930-luku): Nämä olivat höyrypohjaisia järjestelmiä, jotka toimivat hiilellä. Ne otettiin käyttöön Yhdysvalloissa 1880-luvulla ja saavuttivat suosiota myös joissakin Euroopan maissa. Järjestelmät toimivat korkeissa lämpötiloissa betonisissa kanavissa, mikä teki niistä melko tehottomia. Varhaisten järjestelmien korkea höyrynpaine aiheutti myös merkittäviä toimintariskejä. (Vihavainen 2025, 6–7)

Toinen sukupolvi (1930-luku – 1970-luku): Tässä vaiheessa siirryttiin käyttämään lämmönsiirtoaineena paineistettua kuumaa vettä ja järjestelmien syöttölämpötilat olivat yli 100 °C. Putket sijaitsivat edelleen betonisissa kanavissa, jotka usein koottiin paikan päällä. Tyypillisiä tämän sukupolven järjestelmiä olivat Neuvostoliiton tyylliset kaukolämpöjärjestelmät, joita rakennettiin toisen maailmansodan jälkeen useisiin Itä-Euroopan maihin. Polttoaineina näissä käytettiin hiiltä ja öljyä. (mts. 7–9)

Öljyn turvauduttiin myös Saarijärvellä, jossa hakepolttolaitoksena aloittanut Myllyperän lämpölaitos muutettiin käyttövarmuuden ja polttoaineen saatavuuden turvaamiseksi melko pian polttoöljyä käyttäväksi (Kauppinen 2021, 7). Vuosien mittaan tehtyjen hankintojen myötä öljykattiloiden yhteisteho vuoden 1975 alussa olikin jo 10,91 MW (mts. 19–20).

Kolmas sukupolvi (1970-luvulta eteenpäin): Tätä kutsutaan usein ”skandinaaviseksi kaukolämpöteknologiaksi”, sillä monet alan komponenttivalmistajat sijaitsevat Skandinaviassa. Järjestelmissä käytetään valmiita, esieristettyjä maahan haudattuja putkia, ja ne toimivat alhaisemmissa lämpötiloissa (alle 100 °C). Polttoaineina käytetään usein hiiltä, biomassaa ja jätettä. Öljyn käyttö väheni merkittävästi ja myös geotermistä ja aurinkoenergiaa alettiin hyödyntää. (Vihavainen 2025, 9–10)

Öljykriisien jälkeen ensisijaisena tavoitteena oli parantaa energiatehokkuutta ja varmistaa energian saatavuus. Saarijärvellä tähän pyrittiin 1990-luvulla Myllyperän lämpölaitokselle asennetulla lauhdejärjestelmällä, joka polttoprosessissa syntyvän savukaasun lämpöenergian talteenotolla tehosti energiantuotantoa ja vähensi polttoaineen kulutusta. Järjestelmä oli yksi ensimmäisistä koko Euroopassa. (Kauppinen 2021, 7.)

Neljäs sukupolvi (kehitteillä): Tämän sukupolven tavoitteena on torjua ilmastonmuutosta ja integroida uusiutuvia energialähteitä erittäin joustavasti. Järjestelmät pyrkivät toimimaan entistä alhaisemmissa lämpötiloissa. (Vihavainen 2025, 10–12)

Viides sukupolvi / Kylmä kaukolämpö (tulossa): Tässä konseptissa lämpöä jaetaan lähellä ympäristön maanlämpötilaa ja jokainen rakennus käyttää lämpöpumppua lämmitykseen ja jäähdytykseen. (mts. 12–13)

Yksi merkittävä teknologinen edistysaskel oli yhdistetyn sähkön ja lämmön tuotannon (CHP) kehittäminen, joka paransi merkittävästi energiatehokkuutta tuottamalla sekä sähköä että lämpöä samasta laitoksesta. Tämä mahdollisti polttoaineen tehokkaamman hyödyntämisen. Muita keskeisiä teknologisia innovaatioita olivat Franz San Gallin vuonna 1855 keksimä patteri, James Wattin vuonna 1784 suorittama höyryn käyttö lämmitykseen, sekä Strebel-kattilan kehittäminen vuonna 1892. Nämä keksinnöt olivat tärkeitä askelia kohti tehokkaampia lämmöntuotanto- ja -jakelujärjestelmiä. (Nordic Tec 2025.)

Myös Saarijärven Kaukolämpö Oy on kehittänyt toimintaansa jatkuvasti ja edistänyt koko alaa osallistumalla valtakunnallisiin tutkimusprojekteihin. Tämä periaate on selvästikin yhä voimissaan, kun esimerkiksi nyt kuutisenkymmentä vuotta vuosien 1966–1967 myönteisiä tuloksia tuottaneiden kävynpolttokokeilujen (Hänninen 1991, 17) jälkeenkin käynnissä on edelleen uusia lämmöntuotannon modernisointihankkeita mm. datakeskuksen hukkalämpöön ja sähkökattilaan liittyen. (Saarijärven Kaukolämpö Oy toimintakertomus 2024.) Tämän vuosia ja vuosikymmeniä jatkuneen kehitystyön johdosta voidaankin todeta Saarijärven Kaukolämmön pysytelleen mainiosti aivan kaukolämmön kehityksen kärjessä, niin kansallisesti kuin kansainvälisestikin.

5 Kaukolämmön tuotanto ja varastointi

Tässä luvussa esitellään yleisimpiä kaukolämmön tuotanto- ja varastointitapoja. Pitkän historiansa aikana kaukolämpöä on tuotettu pääasiassa polttavilla menetelmillä, mutta nykyään niiden rinnalle ovat nousseet myös sähköön ja hukkalämmön hyödyntämiseen liittyvät ympäristöystävällisemmät ratkaisut. Sähkökattilaa lukuun ottamatta kaikki seuraavat menetelmät ovat tällä hetkellä mukana Saarijärven kaukolämmön tuotannossa.

5.1 Polttavat menetelmät

Polttavan tuotantolaitoksen toiminta perustuu lyhykäisyydessään siihen, että sen kattilassa poltetaan siihen suunniteltua polttoainetta. Kattilat suunnitellaan juuri kyseistä polttoainetta silmällä pitäen ja esimerkiksi savukaasukanavat mitoitetaan palamisen tuotosten mukaan. Kosteimmat polttoaineet tuottavat kosteampia savukaasuja, jotka vaativat kanavalta enemmän tilavuutta. Savukaasujen lämpötilaa pitää myös pitää silmällä jo suunnittelupöydältä alkaen, sillä savukaasuka-

navan loppupäässä liiallinen lämpötilanlasku voi altistaa erilaisten syövyttävien yhdisteiden muodostumiseen. Nämä yhdisteet ja niiden mahdollinen muodostuminen onkin syytä ottaa huomioon polttoainetta valittaessa. Kattilan tulipesään syötetään ilmaa mahdollisimman puhtaan palamisen takaamiseksi ja kattilatyyppistä riippuen, sen petimateriaalin leijuttamiseksi.

5.1.1 Arinapoltto

Yksi vanhimmista kiinteiden polttoaineiden polttomenetelmistä on arinapoltto, jota on käytetty erityisesti pienten ja keskisuurten lämpölaitosten energiantuotannossa jo teollistumisen alkua ajoista lähtien. Menetelmä perustuu siihen, että polttoaine, kuten puuhake, turve tai muu biomassapohjainen materiaali syötetään arinalle, jossa se palaa hallitusti pohjan läpi johdetun ilman avulla. Perinteisesti arinat olivat kiinteitä, mutta tekniikan kehittyessä käyttöön ovat yleistyneet myös mekaaniset, liikkuvat arinat, jotka mahdollistavat tasaisemman palamisen ja polttoaineen paremman käsittelyn. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 285.)

Arinapoltto on toimintavarma ja suhteellisen yksinkertainen menetelmä, joka soveltuu erityisesti polttoaineille, joita voidaan käyttää suurina partikkeleina ilman merkittävää esikäsittelyä. Järjestelmän oma energiankulutus on usein pieni, mutta sen heikkouksina ovat palamisen säädön haitta, polttoaineen laadunvaihtelut sekä epätäydellisestä palamisesta johtuvat päästöt ja tuhkahäviöt. (Mts. 286.)

Palamisilma johdetaan arinan alle (primääri-ilma), ja mahdollisesti myös sen yläpuolelle (sekundääri- ja tertiääri-ilma), jotta myös polttoaineesta vapautuvat palamiskelpoiset kaasut saadaan hyödynnettyä tehokkaasti. Ilmavirtausten säätö, ilman jakautuminen sekä suutinratkaisut vaikuttavat suoraan palamisen laatuun ja päästöihin. Ilman esilämmitys myös parantaa hyötysuhdetta ja pienentää savukaasuhäviöitä. (Mts. 288.)

Polttoaineen syöttöjärjestelmä on keskeinen osa arinapolttota. Polttoaineen tulee levittyä arinalle tasaisesti, sillä toisin kuin leijupoltossa, arinapolttossa polttoaine ei sekoitu tehokkaasti keskenään, varsinkaan leveyssuunnassa. Epätasaisesti levittynyt polttoaine voi aiheuttaa sen, että ilma kulkee helpoimmin niistä kohdista, joissa vastus on pienin, mikä heikentää palamista. Suuremmissa kattiloissa polttoaine syötetään usein painovoimaisesti koko arinan leveydeltä, kun taas alasyöttöisissä järjestelmissä se johdetaan ruuvilla arinan keskelle ja siitä ympärille leviämään. (Mts. 286–287.)

Tulipesän rakenne suunnitellaan polttoaineen ominaisuuksien mukaan. Hyvin syttyvät ja kuivat polttoaineet toimivat myötävirtaperiaatteella, jossa kaasut johdetaan liekkialueen läpi loppuun palamista tehostaen. Kosteille ja hitaasti syttyville polttoaineille taas soveltuu vastavirtaperiaate, jossa kuumat savukaasut suunnataan arinan alkuosaan edesauttamaan kuivumista ja syttymistä. Tulipesän lämpötilatasapaino, säteilyolosuhteet ja mahdollinen jäähdytysratkaisu vaikuttavat merkittävästi palamisen laatuun. (Mts. 288.)

Tuhkan poisto arinapoltossa tapahtuu pääosin arinan läpi painovoimaisesti tai mekaanisten rakenteiden avulla tuhka-arinan kautta. Tuhkaan jää usein merkittävä määrä palamiskelpoista ainesta, ja arinapoltolle tyypillinen tuhkan hehikutushäviö on korkeampi kuin kehittyneemmissä polttomenetelmissä kuten leijupoltossa. Osa hiukkasista poistuu myös savukaasun mukana ja näiden määrään vaikuttavat erityisesti polttoaineen partikkelikoko sekä kaasun virtausnopeus polttoainekerroksen pinnassa. (Mts. 289.)

Vaikka arinapoltto ei edusta moderneinta lämmöntuotantotekniikkaa, se on edelleen laajasti käytössä ja erityisesti niissä kohteissa, joissa toimintavarmuus, investointikustannukset ja polttoaineen saatavuus ovat ratkaisevassa roolissa.

5.1.2 Leijupoltto

Nykyään yksi merkittävimmistä kiinteiden polttoaineiden polttotekniikoista on leijupoltto, joka on saavuttanut vakiintuneen aseman erityisesti suurissa lämpö- ja voimalaitoksissa. Suomessa leijukerrostekniikkaa on kehitetty jo 1960-luvulta lähtien ja nykyisin se tunnetaan erityisesti sen monipuolisuudesta ja ympäristöystävällisyydestä. Menetelmä perustuu niin kutsuttuun leijupetiin, eli hiekasta tai muusta petimateriaalista muodostuvaan kerrokseen, johon syötetään polttoainetta ja jota pidetään jatkuvassa liikkeessä pohjasta puhallettavan ilman avulla. (Koskelainen ym. 2006, 289.)

Tämä rakenne mahdollistaa erittäin hyvän sekoittumisen kaasun ja kiintoaineen välillä, mikä tekee polttoprosessista tehokkaan myös silloin, kun käytetään kosteaa tai matalalämpöarvoista polttoainetta. Leijupolton hyötysuhde säilyy hyvänä jopa osakuormilla ja se kestää hyvin polttoaineen laa-

dun sekä ominaisuuksien vaihtelua. Samassa kattilassa voidaan polttaa useita eri polttoainetyyppejä, ilman että toiminta häiriintyy merkittävästi. Tämä tekee leijupoltosta erittäin joustavan ratkaisun etenkin bio- ja kierrätyspohjaisten polttoaineiden hyödyntämisessä. (Mts. 289.)

Rakenteellisesti leijukattilat ovat yksinkertaisia ja koska niissä on vain vähän liikkuvia osia, niiden huoltotarve on verrattain pieni. Polttolämpötila pidetään tarkoituksella matalana ja tasaisena, yleensä 800–950 °C:n välillä, mikä vähentää typen oksidipäästöjä. Lisäksi kattilaan voidaan syöttää kalkkikiveä tai dolomiittia sitomaan rikkiyhdisteitä, jolloin myös rikkidioksidipäästöjä saadaan hallittua tehokkaasti. Koska palamislämpötila pysyy tuhkan sulamispisteen alapuolella, vähenee samalla myös kattilan likaantumis- ja kulumisriski. Lämmönsiirto leijupedistä kattilan vesipiiriin on erinomainen, mikä tukee korkean kokonaishyötysuhteen saavuttamista. (Mts. 289.)

Haasteita kuitenkin on, sillä leijupedin voimakas ilmankierto aiheuttaa suurta painehäviötä, mikä näkyy järjestelmän korkeamana omakäyttösähkön kulutuksena. Lisäksi pedissä olevat lämmönsiirtoputket altistuvat eroosiolle, sillä kiinteät hiukkaset kulkeutuvat jatkuvasti niiden ohi suurilla nopeuksilla. Tätä voidaan ehkäistä suojaamalla putket kulutusta kestäville pinnoitteilla tai muurauksilla. Leijukattilat eivät myöskään edellytä merkittävää polttoaineen esikäsitteilyä vaan riittää, että raaka-aineesta erotetaan metallit ja tarvittaessa se seulotaan tai murskataan. (Mts. 289.)

Leijupolton eri teknisiä toteutusmuotoja ovat kupliva, turbulenti ja kiertoleijupeti. Kuplivassa pedissä polttoaine palaa pääosin emulsiofaasissa kaasukuplien läpäistessä reaktiokerrosta. Turbulentissa pedissä virtaus on voimakkaampaa, ja osa petimateriaalista kulkeutuu kaasun mukana tulipesän yläosiin. Kiertoleijupedissä hiukkaset kulkevat jatkuvasti kaasuvirran mukana pois pedistä ja palautetaan syklonien ja putkistojen avulla takaisin, mikä mahdollistaa erittäin tehokkaan palamisen ja suuremman lämmön tuotannon. (Mts. 289.)

Leijukattilat jaetaan toiminnallisesti kahteen pääryhmään: kerrosleijukattiloihin ja kiertoleijukattiloihin. Ensimmäisessä petimateriaali ja polttoaineet pysyvät pääosin tulipesässä, kun taas jälkimmäisessä ne kiertävät järjestelmässä erottimien kautta. Kerrosleijukattiloissa on yksinkertaisempi rakenne, joka tekee niistä edullisempia, erityisesti pienemmissä laitoksissa. Ne soveltuvat hyvin myös kosteille ja matalalämpöarvoisille polttoaineille. Kiertoleijukattilat puolestaan mahdollistavat

suuremmat tehot, matalammat päästöt ja laajemman polttoainevalikoiman, mutta vaativat enemmän laitteistoa ja investointeja. (Mts. 290–291.)

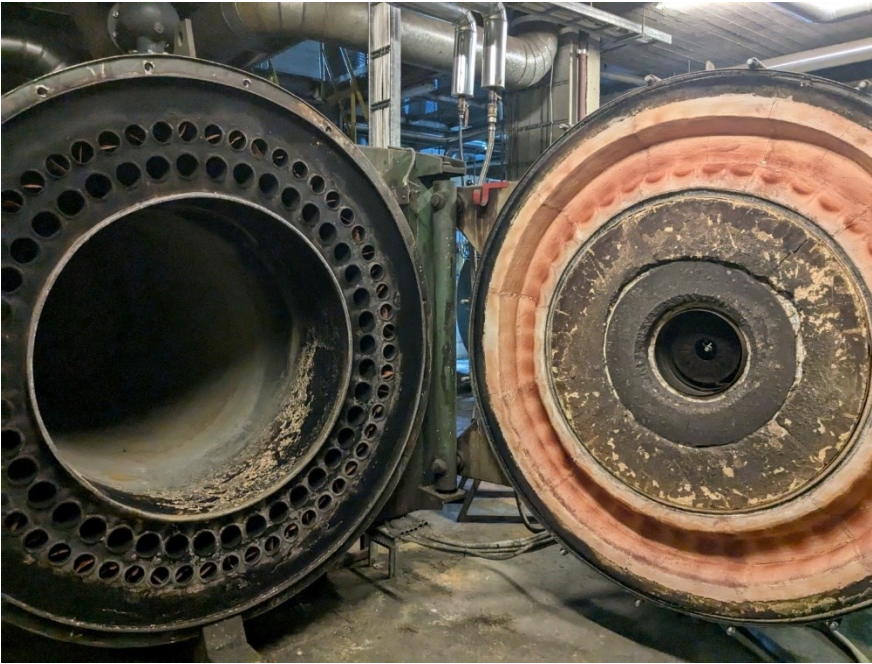
Palamisilma syötetään vaiheittain tulipesään. Primääri-ilma johdetaan arinan alta ja sekundääri- sekä tertiääri-ilma ylemmäs tulipesään. Tämä vaiheistus parantaa palamista ja mahdollistaa päästöjen hallinnan. Tulipesän alaosa suojataan eroosiolta yleensä muurauksilla ja kattilan pohjatuhka poistetaan mekaanisesti joko arinan alta tai sivuilta. Osa hienojakoisesta aineksesta voidaan palauttaa takaisin tulipesään, mikä parantaa hyötysuhdetta ja vähentää jätettä. (Mts. 292.)

Yhteenvedona leijupoltto tarjoaa tehokkaan, monipuolisen ja vähäpäästöisen tavan hyödyntää kiinteitä polttoaineita. Sen vahvuus piilee polttoainejoustavuudessa, hyvässä säädettävyydessä ja ympäristövaikutusten hallinnassa, mikä tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon nykyaikaisessa kaukolämmön tuotannossa.

5.1.3 Öljykattilat

Kevyt polttoöljy on kasvihuonepäästöjä lisäävä fossiilinen polttoaine, jonka käyttöä rajoittaa vaihteleva ja suhteellisen korkea hinta. Sen polttoprosessi on kuitenkin oikein säädettynä luotettava, ja sillä on korkea hyötysuhde. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 37.) Polttoöljyä käytetään nykyään pääasiassa huippu- ja varalaitoksissa toimintavarmuuden ja kaukokäynnistyksen helppouden vuoksi (mts. 32).

Yksittäiset öljykattilat ovat nykyään 12–15 MW kattilatehoon asti yhden tulitorven tulitorvi-tuliputkikattiloita, joissa savukaasut virtaavat tulitorvessa ja tuliputkien sisäpuolella. Ohessa myös havainnollistava kuvio 1, josta käy ilmi öljykattilan tulitila. Toisen tulitorven lisäyksellä päästään vielä 25–30 MW:n tehoon, mutta sitä suuremmat kattilat ovat yleensä jo vesiputkikattiloita, koska tuliputkien rakenne tekee suurempien yksiköiden valmistamisesta ja sijoittamisesta hankalaa. Näiden kattiloiden paine on yleensä alle 20 bar. (Koskelainen ym. 2006, 282.)



Kuvio 1. Öljykattilan tulipinnat (Roponen 2025).

Vesiputkikattiloissa putkien sisällä virtaa vettä ja ulkopuolella savukaasuja. Niiden tulipinta verrattuna vesitilavuuteen on tulitorvi-tuliputkikattilaa suurempi, ja niiden rakenne mahdollistaa myös erittäin korkeat paineet. (Mts. 283.)

Tulitorvi-tuliputkikattilat ovat niin sanottuja suurvesitilakattiloita ja vesiputkikattilat joko kuuma-vesikattiloita tai kylläisen tai tulistetun höyryn kattiloita. Näiden pienempien vesimäärien kattiloiden etuna on, etteivät mahdolliset käytönaikaiset vuodot aiheuta yleensä kovin vakavia vaurioita. (Mts. 283.)

5.2 Sähkökattilat

Sähkövastuskattila toimii yksinkertaisella periaatteella. Se lämmittää vettä sähkölämmityselementtien avulla samaan tapaan kuin suuri vedenkeitin. Koska sähköenergia muuttuu suoraan lämmöksi ilman polttoaineen käsittelyä tai monimutkaisia apulaitteita, sähkökattilat ovat rakenteeltaan hyvin yksinkertaisia ja luotettavia. Tämä tekee niistä myös helppoja ylläpitää ja kustannuksiltaan kevyempiä verrattuna polttaviin kattiloihin (Electrode Boiler Installation, Operation, and Maintenance 2013.)

Huollon tarve on vähäinen ja rajoittuu pääasiassa sähkövastusten vaihtoon, mikä on suhteellisen nopea ja edullinen toimenpide. Käyttövarmuuden varmistamiseksi riittää säännöllinen seuranta ja tarkastukset, kuten kuukausittaiset ja vuosittaiset kierrokset. Veden laadun hallinta on kuitenkin tärkeää, sillä epäpuhtaudet voivat aiheuttaa kalkkikiveä ja korroosiota, jotka heikentävät hyötysuhdetta ja lyhentävät käyttöikä. (Mt; Code of Practice for the Safe Operation of Electric Steam Boilers 2013.)

Sähkökattilan toimintavarmuutta tukee myös sen selkeä dokumentointi. Kaikki tarkastukset, hälytykset ja huoltotoimet kirjataan kattilakirjaan, mikä helpottaa vikatilanteiden selvittämistä (Tukes 2025). Yhdessä ammattitaitoisen käyttöhenkilökunnan kanssa tämä varmistaa, että sähkökattila on paitsi helppohuoltoinen, myös erittäin luotettava osa kaukolämmön tuotantojärjestelmää.

5.3 Lämmön talteenotto (LTO)

Savukaasupesuri on keskeinen teknologia, joka mahdollistaa lämmön talteenoton (LTO) prosessissa syntyvistä savukaasuista. Se tuottaa merkittävää liiketaloudellista hyötyä ja parantaa lämpöä tuottavan laitoksen energiatehokkuutta, koska sen avulla hukkalämpö, joka muuten poistuisi savupiipun kautta ilmakehään, saadaan hyödynnettyä. Lisäksi pesuri toimii savukaasujen kustannustehokkaana puhdistimena, rajoittaen laitoksen päästöjä. (Järvenreuna 2014.)

LTO:n tehostamiseksi on ensiarvoisen tärkeää, että savukaasujen sisältämän vesihöyryn lämpötila lasketaan pesurissa kastepisteen alapuolelle. Vesihöyryn faasimuutos (lauhtuminen) vapauttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin pelkkä lämpötilan lasku samassa faasissa. Lauhtumisessa vapautunut energia siirtyy kiertoveteen ja edelleen lämmönvaihtimen kautta kaukolämmön paluuveteen, maksimoiden energiansiirron. Jos kastepistettä ei saavuteta ja pesuriin saapuvat savukaasut ovat liian kuumia, pesuri voi alkaa toimia höyrytimenä, jolloin kiertovettä höyrystyy ja poistuu savukaasujen mukana, heikentäen merkittävästi LTO-kykyä. Kastepisteen saavuttaminen on lisäksi tärkeä pesurin puhtaana pysymisen ja tukkeutumisen estämisen kannalta. (Mt.)

Optimaalisen toiminnan varmistamiseksi kaukolämpöverkon paluueden riittävän viileä lämpötila on kriittinen tekijä, sillä lämpimämpi paluuvesi voi estää kastepisteen alittamisen. Esimerkiksi huonohyötysuhteiset, riittämättömästi jäähdyttävät kiinteistökohtaiset lämmönvaihtimet voivat nos-

taa paluuveden lämpötilaa liikaa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi voidaan käyttää lämpöpump-
puratkaisuja paluuveden esijäähdytykseen ennen pesuria. Tällöin pesuriin virtaa viileämpi vesi,
kastepiste alittuu ja LTO-prosessi toimii optimaalisesti. LTO-prosessin jälkeen lauhdutettu lämpö
palautetaan järjestelmään, ja vesi jatkaa matkaansa takaisin kattilaan lämmitettäväksi. (Mt.)

5.4 Kaukolämpöakku

Kaukolämpöjärjestelmän lämmöntarve vaihtelee sekä lämpimän käyttöveden että rakennusten
lämmitysenergian mukaan. Molemmat tarpeet ovat ennustettavissa, mutta erityisesti lämmitysve-
den kysyntä reagoi ulkolämpötilan muutoksiin. Kylmän sään yllättäessä järjestelmän on kyettävä
vastaamaan kasvavaan kuormaan nopeasti, mihin eräs merkittävä ratkaisu on kaukolämpöakku.
Teknisesti kyseessä on suuri vesisäiliö, jossa lämpö kerrostuu: kuuma vesi jää säiliön yläosaan ja
viileämpi kerääntyy alaspäin. Tällaisessa säiliössä veden varastointikyky on noin $1,16 \text{ kWh/m}^3/\text{°C}$
(Koskelainen ym. 2006, 386). Kaukolämpöakku toimii siis lämpövarastona, jonka avulla kulutustar-
peen vaihteluihin voidaan reagoida ilman, että kattiloiden tarvitsee muuttaa ajotapaansa tai käyn-
nistyä kiireellisesti. (Mts. 383.)

Kaukolämpöakku tasaa lämpökuormaa ja toimii myös energiavarastona, joka voidaan ladata ja
purkaa tarpeen mukaan. Esimerkiksi päivällä tuotettua lämpöä voidaan varastoida ja hyödyntää
yöllä. Akku toimii lisäksi vesireservinä ja joissain tapauksissa myös verkoston paisuntasäiliönä (mts.
384).

Kaukolämpöakun etuna on, ettei huippukuormia tarvitse kattaa heti kalliilla huipputeholla. Akun
avulla voidaan hyödyntää ylituotantoa, jolloin kattiloita voidaan ajaa tasaisemmin ja optimaalisem-
millä tehoilla. Tämä on tärkeää myös päästöjen kannalta, sillä pienemmillä tehoilla ajettaessa syn-
tyy suhteessa enemmän päästöjä. (Mts. 383.) Lisäksi järjestelmää voidaan "ladata" nostamalla
kaukolämpöverkon menoveden lämpötilaa tilapäisesti yli normaalitason. Tyypillinen lämpötilan
korotus on noin $5\text{--}15 \text{ °C}$, ja verkkoa ladataan noin 2–3 tunnin ajan. Tämä mahdollistaa ennakoin-
nin lyhytaikaiseen kulutuksen kasvuun ja lisää järjestelmän kokonaisjoustavuutta mm. sallimalla
lyhyet huoltoseisokit lämmityskauden aikana ilman lämmönjakelun keskeytymistä. (Mts. 389.)

6 Kaukolämmön siirto

Tässä luvussa käsitellään kaukolämmön teknistä toteutusta, mukaan lukien tuotantolaitokset, verkon rakenne ja lämmönsiirron mekanismit. Painopisteenä on esitellä järjestelmän teknologiaa ja toimintaperiaatteita valmistaen lukijaa ymmärtämään, miten datakeskuksen hukkalämpö voidaan liittää tehokkaasti osaksi kaukolämpöverkkoa. Putkiston eristykset, liitokset, asennussyvyudet ja muut seikat, jotka eivät ole ensisijaisen toiminnan kannalta oleellisia, jätetään tarkastelun ulkopuolelle.

Kaukolämmön jakelu lämmityskohteisiin hoidetaan kaukolämpöverkostolla, jonka fyysinen rakenne koostuu kolmesta pääkomponentista: siirtojohdoista, jotka yhdistävät tuotantolaitokset runkoverkoston; runkojohdoista, jotka kuljettavat lämpöä laajemmilla alueilla; sekä talojohdoista, jotka vievät lämmön suoraan asiakaskohteisiin (Koskelainen ym. 2006, 43; Mäkelä & Tuunanen 2015, 50–51). Se rakentuu pääsääntöisesti meno- ja paluujohdon sisältävästä maanalaisesta (ks. kuvio 2) kaksiputkijärjestelmästä, jossa menojohto kuljettaa kuumaa vettä (tyypillisesti 70–120 °C) tuotantolaitokselta asiakkaille, kun taas paluujohto palauttaa jäähtyneen veden takaisin laitokselle uudelleen lämmitettäväksi. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 51; 17.)



Kuvio 2. Talojohdon asennustyömaa (Roponen 2023)

Jokainen asiakaskiinteistö liitetään kaukolämpöverkkoon omalla lämmönjakokeskuksella, jossa sijaitsee lämmönsiirrin. Se on yksinkertainen mutta kriittinen mekaaninen komponentti, joka erottaa asiakaskohteen vesivirrat kaukolämpöverkoston vedestä. Tällainen Koskelaisen ja muiden kuvaama epäsuora kytkentä (Koskelainen ym. 2006, 43) on välttämätön paitsi siksi, että verkoston paine- ja lämpötasot ovat huomattavasti kiinteistöjen järjestelmiä korkeammat, myös järjestelmän turvallisuuden vuoksi. Lämmönsiirtimien käyttö estää tehokkaasti sen, että mahdollisessa kiinteistön sisäisessä vuototilanteessa koko laaja kaukolämpöverkosto pääsisi tyhjenemään esimerkiksi kiinteistön kellaritiloihin. Täten ne suojaavat rakennusta vesivahingoilta ja varmistavat samalla koko kaukolämpöjärjestelmän käyttövarmuuden jatkumisen. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 64.)

Verkostossa kulkeva vesi on kemiallisesti käsiteltyä ja suodatettua, jotta se sisältäisi mahdollisimman vähän hapen ja putkiston seinämistä irronneiden roskien kaltaisia haitallisia komponentteja, jotka voivat aiheuttaa laitteiden tarkoituksenmukaista toimintaa haittaavaa korroosiota tai kerrostumia (Koskelainen ym. 2006, 44). Menojohtoon pumpattaessa sen lämpötila saattaa lämmön kysynnästä johtuen olla joskus yli 100 °C, joka tavallisessa ilmanpaineessa olisi höyryfaasissa. Kaukolämpöverkostossa vesi pysyy kuitenkin nesteenä tuotantolaitosten pumppujen tuottaman tarpeeksi suuren paineen vaikutuksesta. Tätä painetta tarvitaan myös veden siirtämiseen käyttökohteeseen. Pitkillä siirtoyhteyksillä painehäviöt voivat olla kuitenkin huomattavia, joten tarvittaessa painetta voidaan korottaa siirtoyhteyden varrelle sijoitetulla paineenkorotusasemalla. (Koskelainen ym. 2006, 44.)

Kuten Suomalainen kaukolämmitys -teoksen kirjoittajat korostavat, kaukolämpöputket mitoiteetaan aina tapauskohtaisesti, sillä energian tarve on riippuvainen alueellisesta energiantarpeesta (Mäkelä & Tuunanen 2015, 52). Ohjurina menoveden lämpötilalle toimii ulkolämpötila, joten se on käytännössä kaikkialla saman lämpöistä. Tarvitsemansa energiamäärän asiakaskohde ottaa verkostossa säätämällä kaukolämpöveden massavirtaa. (Koskelainen ym. 2006, 335.)

Mitoituksessa huomioidaan tavallisesti nykytilanteen lisäksi myös mahdollinen energiantarpeen kasvu sekä verkoston laajennus tulevaisuudessa, joten siinä on yleensä vastaavanlaista kasvuvaraa kuin lapsille ostettavissa kengissä. Sitä ei saa kuitenkaan olla liikaa, koska ympäristöönsä lämpimämpää vettä siirrettäessä syntyy aina lämpöhäviötä, jonka suuruus riippuu karkeasti jaoteltuna

lämpötilaerosta ja putken koosta seuraavan Newtonin jäähtymislaista johdetun kaavan 1 mukaisesti:

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T \quad (1)$$

jossa

\dot{Q} =	lämpöhäviö, [W]
U =	lämmönläpäisykerroin, W/(K·m ²)
A_s =	lämpöä johtava pinta-ala, [m ²]
ΔT =	lämpötilaero siirtymäkohtien välillä, [K]

Vaikka lämpöhäviötä pyritään estämään mm. putkia eristämällä, sitä ei voida kokonaan eliminoida. Kaukolämmön käsikirjan mukaan pienten, keskimäärin putkikokoa DN50 käyttävien verkkojen lämpöhäviöt ovatkin suuruusluokkaa 10–20 %, mikä on suhteellisesti isompaa kuin keskimääräistä DN150-putkikokoa käyttävien suurempien verkkojen 4–10 % lämpöhäviö. Tämä johtuu putken siirtokykyyn nähden suhteellisesti suuremmasta vaippapinta-alasta. (Koskelainen ym. 2006, 203.)

Kaukolämmön verkkoon siirretty teho voidaan vastaavasti laskea kaavasta 2:

$$\Phi = \rho \cdot q_v \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

jossa

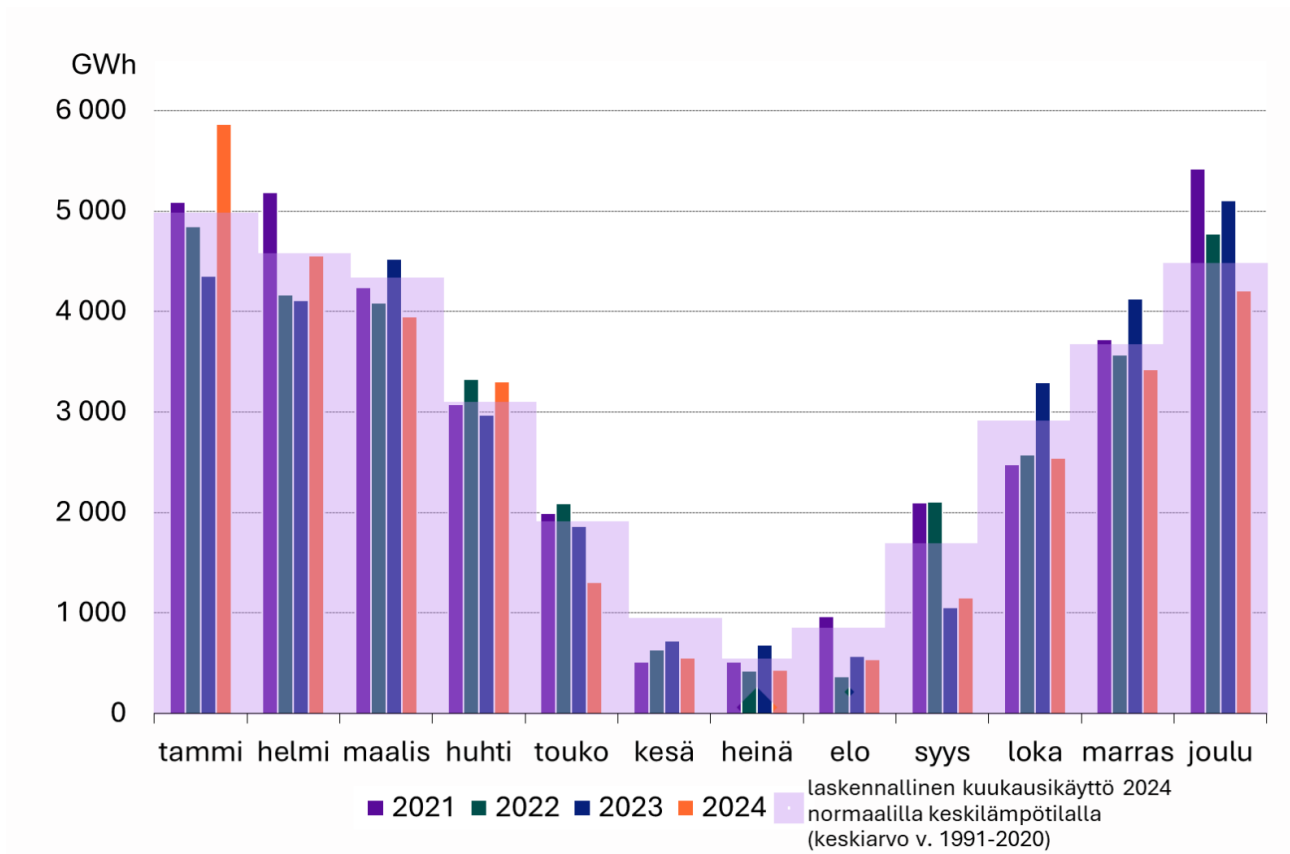
Φ =	verkkoon siirretyn tehon määrä, [kW]
ρ =	verkoston veden tiheys, [kg/dm ³]
q_v =	verkoston veden virtaama, [dm ³ /s]
c_p =	verkoston veden ominaislämpökapasiteetti, [kJ/kg·K]
ΔT =	verkoston meno- ja paluuv veden välinen lämpötilaero, [K]

Eräs tärkeä mittari kaukolämpöjärjestelmän suunnittelussa ja optimoinnissa on huipunkäyttöaika, joka auttaa arvioimaan tuotantolaitosten ja verkoston kapasiteetin riittävyyttä eri kuormitustilanteissa. Pääasialliset lämmöntarpeen lähteet ovat rakennusten tilojen lämmitys ja lämpimän käyttö-

veden tuotanto. Talvella, erityisesti silloin kun keskilämpötila on noin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, rakennusten lämmöntarve voi nousta noin 50 % liitännätehosta, kun taas kesäaikaan ulkolämpötilan ollessa korkeampi lämmitystarve vähenee ja kaukolämmön kulutus painottuu lämpimän käyttöveden tuotantoon. Tällöin käyttöveden lämmitys voi muodostaa noin 6 % rakennuksen liitännätehosta. (Hakala 2022.)

Vaikka sääolosuhteet voivat vaihdella vuosittain, kuten kuviosta 3 käy ilmi, lämmöntarpeen vaihtelut ovat yleensä yhdenmukaisia tarkasteltavien vuosien välillä. Kaukolämpölaitosten huipunkäyttöaika, joka kuvaa laitoksen käyttöä täydellä teholla vuoden aikana, on tyypillisesti noin 3200 tuntia vuodessa. Tämä tarkoittaa, että laitosta käytetään täydellä teholla noin 36 % vuoden tunneista, mikä heijastaa lämmöntarpeen kausivaihteluita. (Hakala 2022; Koskelainen ym. 2006, 41–42.) Ymmärtämällä lämmöntarpeen vaihtelut ja huipunkäyttöajan merkityksen voidaan varmistaa kaukolämpöjärjestelmän tehokkuus ja lämmön saatavuus kaikissa olosuhteissa.

Suomalainen kaukolämpöjärjestelmä tunnetaankin erinomaisesta luotettavuudestaan. Kun verkostot ovat vaatimiensa suurten putkimäärien ja korkeiden asennuskustannusten vuoksi varsin kalliita, niiden suunniteltu käyttöikä on tyypillisesti 30–50 vuotta, mutta parhaimmillaan putkistot voivat pysyä käyttökelpoisina jopa 70–100 vuotta. Ehkä tästä syystä toimitusvarmuus onkin erittäin korkea, yltyen jopa 99,98 %:iin, ja verkostovaurioiden aiheuttamat lämmöntoimituksen keskeytykset vuosittain keskimäärin vain 1,5–2 tuntia asiakasta kohden. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 16.)



Kuvio 3. Kaukolämmön kuukausikäyttö 2024 (Kaukolämpövuosi 2024, 2025)

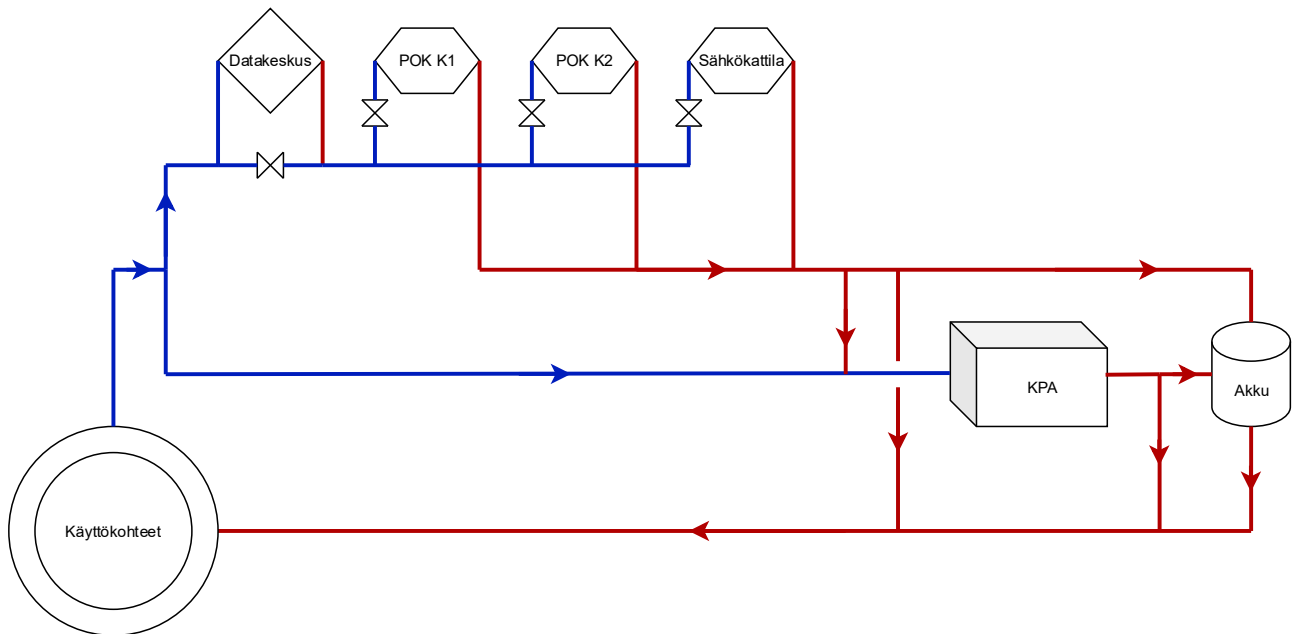
7 Datakeskus: tekninen toteutus ja kytkentä

Saarijärvellä kaukolämpö tuotetaan kahdella kiinteän polttoaineen laitoksella, KPA 1:llä ja KPA 2:lla. Keväisin, ulkolämpötilojen noustessa, KPA 2 ajetaan alas vuosihuoltoa varten, ja tällöin KPA 1 vastaa yksin kaukolämmön tuotannosta. Kun KPA 2:n huolto valmistuu, se käynnistetään uudelleen ja KPA 1 voidaan pysäyttää omaan huoltoonsa. Tämä vuorottelukäytäntö varmistaa, että lämmöntuotanto jatkuu keskeytyksettä myös huoltoseisokkien aikana.

Datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen tuo tähän prosessiin merkittävää lisäarvoa. Koska datakeskus pystyy kesäaikana kattamaan suuren osan lämmöntarpeesta, huollot voidaan tehdä suunnitelmallisesti ilman aikataulupaineita ja osin jopa samanaikaisesti molemmilla laitoksilla. Tämä mahdollistaa esimerkiksi pienimuotoisten ulkopuolisten urakoitsijoiden tekemien huolto- ja mittaustöiden, kuten anturien kalibroinnin tai säätölaitteiden tarkastusten, suorittamisen kummallakin laitoksella vaarantamatta ei-huollossa olevan laitoksen toimintavalmiutta.

Pitkällä aikavälillä polttavien kattiloiden pidemmät seisokit vähentävät niiden mekaanista kulumista ja sen myötä myös huollon tarvetta. Kesäkaudella datakeskus voi lisäksi helpottaa KPA-laitosten päivystystä vähentämällä häiriötilanteita, mikä sekin lisää toiminnan kustannustehokkuutta.

Datakeskuksesta verkkoon johdettavan menoveden tärkein laatuvaatimus on sen lämpötila. Sen tulee olla riittävä, jotta käyttövesi täyttää asuinkiinteistöille asetetut terveydensuojelulliset standardit. Suomessa lämmin käyttövesi on toimitettava siten, että sen lämpötila on vähintään +55 °C mutta alle +65 °C, jotta legionellabakteerien kasvu voidaan estää (STM:n asetus talousveden laatuvaatimuksista 1352/2015). Tarvittaessa datakeskuksen tuottamaa vettä voidaan priimata sähkökattilan avulla.



Kuvio 4. Datakeskuksen kytkentä

Kytkenän peruseriaatteena (ks. kuvio 4) on, että datakeskus liitetään kaukolämpöverkkoon paluupuolen kautta. Paluuvesi johdetaan ensin datakeskuksen lämmönvaihtimen läpi, minkä jälkeen se kulkee sähkökattilalle. Sähkökattilasta lämpö voidaan ohjata edelleen verkkoon, KPA 1:lle tai kaukolämpöakkuun. Ylimääräinen lämpö voidaan varastoida kaukolämpöakkuun tai tarpeen mukaan ohjata lämmönsiirtimen kautta poistoon. Lisäksi verkkoon on liitetty rinnakkaisena tuotantomuotona öljykattilat, joita käytetään häiriötilanteissa tai talvikauden huippukuormien aikana.

7.1 Virheenkesto

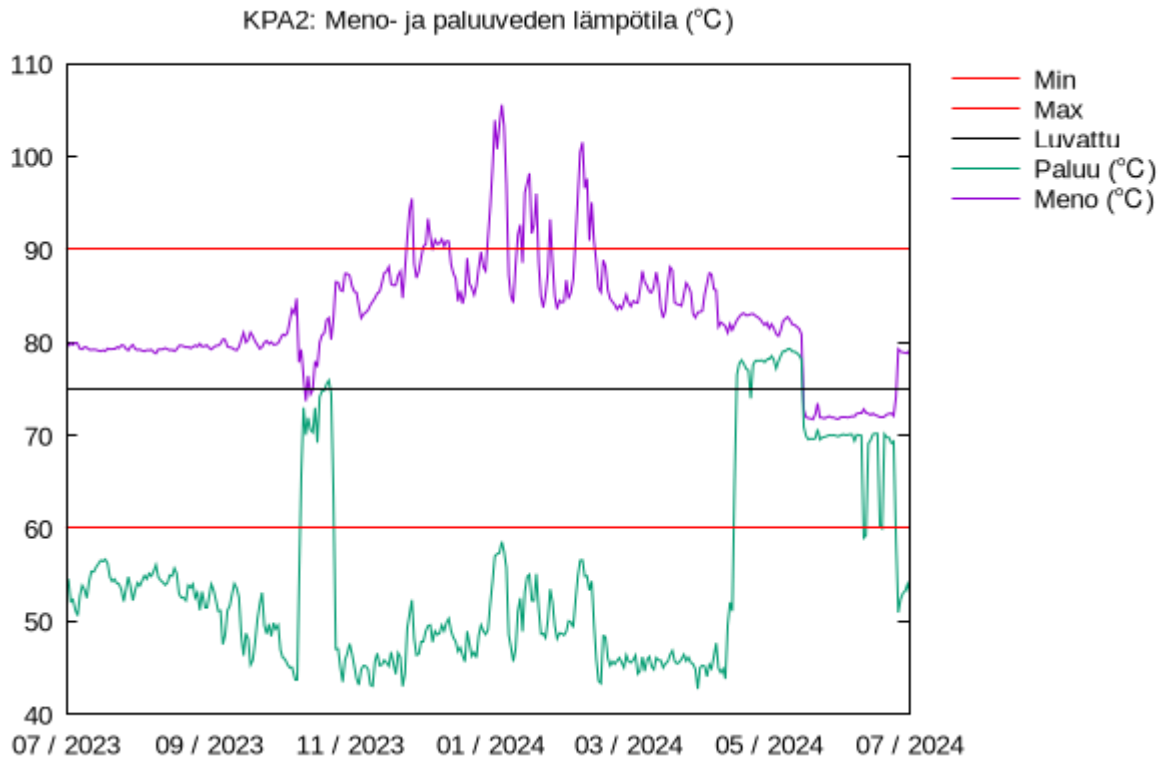
Saarijärven pilottihankkeessa käytettävän datakeskuksen toimintavarmuus on suunniteltu korkealle tasolle. Suomessa sähköverkon luotettavuus on jo lähtökohtaisesti Euroopan parhaimmista, ja tämän päälle datakeskuksessa on toteutettu useita lisävarmistuksia: N+1-redundanssi, kaksi erillistä sähkösyöttöä sekä jatkuva järjestelmävalvonta (Dubrana 2025). Näin varmistetaan, että yhden järjestelmän vika ei keskeytä toimintaa.

Lämmönsiirto kaukolämpöverkkoon on toteutettu moduulimaisen lämmönvaihtimen kautta, joka on varustettu säätöventtiileillä. Tämä ratkaisu pitää datakeskuksen oman vesikierron ja kaukolämpöverkon toisistaan täysin erillisinä. Näin vältetään kriittinen riippuvuus; jos datakeskuksessa ilmenee häiriö, kaukolämmön toimitus jatkuu muilla tuotantoyksiköillä normaalisti, ja toisaalta mahdolliset ongelmat kaukolämpöverkossa eivät vaaranna datakeskuksen toimintaa. Käytännössä tämä kytkentärakenne lisää sekä järjestelmän virheenkestoa että toimitusvarmuutta.

Datakeskuksen mahdollisen suurimittaisen toimintahäiriön aikana varajärjestelmänä voidaan käyttää öljy- tai sähkökattilaa, jolla taataan, ettei lämmöntuotanto keskeydy kokonaan missään tilanteessa.

7.2 Tuotannon määrä ja kulutustrendit

Kuviossa 5 esitetään KPA 2:n kaukolämpöverkoston meno- ja paluuvien lämpötilat vuoden ajalta. Samaan kuvioon on merkitty myös datakeskuksen toimittajan lupaaman hukkalämmön taattu lämpötila ja sen maksimi- ja minimiarvot. Luvattu lämpötila (75 °C) vaikuttaa varsin optimistiselta, sillä datakeskuksista saatava hukkalämpö on korkean lämpötilan sekundäärilämpöä jo silloin, kun se on 30–40 °C (Laihanen, Karhunen, Föhr & Ranta 2024, 19). Asia selittyy luultavimmin sillä, että kyseessä on nimenomaan kaukolämmön tuotantoa varten kehitelty datakeskus.



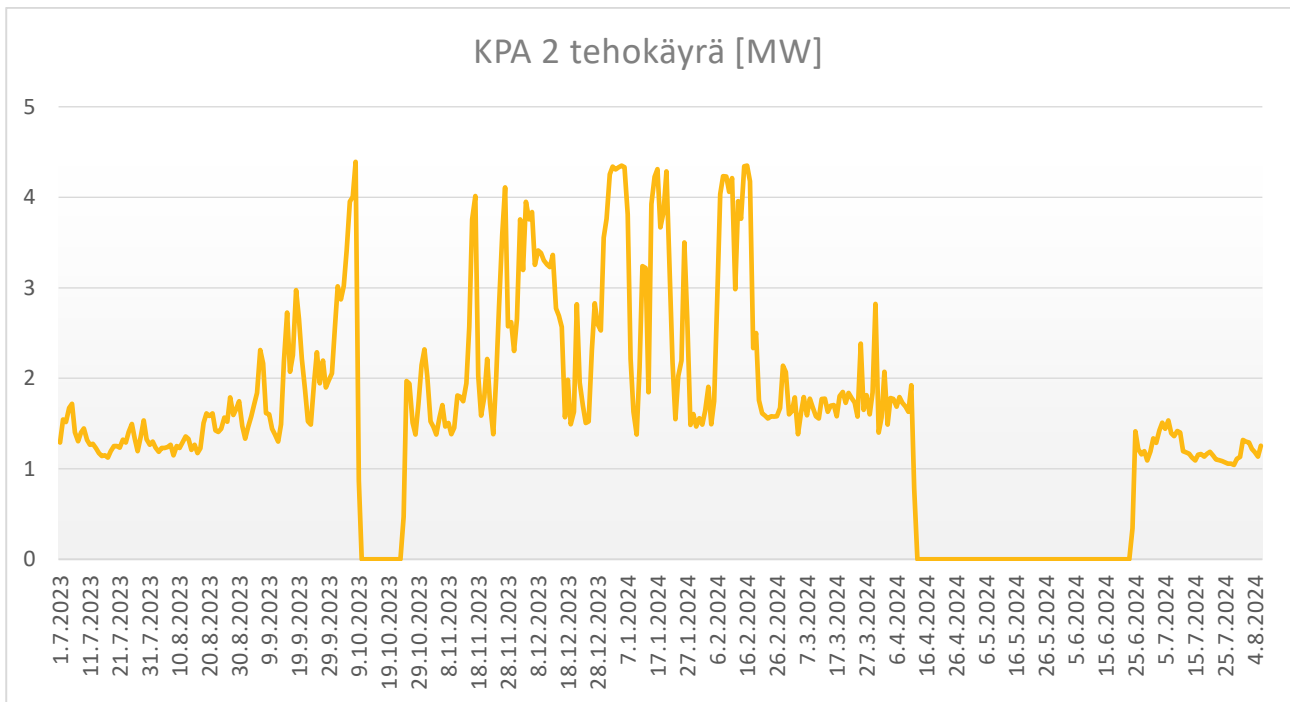
Kuvio 5. KPA 2:n meno- ja paluuveden lämpötila

Kuten kuviosta nähdään, matalan kulutuksen kesäkaudella kaukolämpöverkoston menoveden lämpötilat pysyvät varsin lähellä datakeskuksen lupaamaa hukkalämmön tarjontaa ja jäävät suurimmaksi osaksi jopa maksimituoton alle. Tämä tarkoittaa sitä, että parhaassa tapauksessa hukkalämpö riittää jo itsessään kattamaan koko verkon lämmöntarpeen, mutta tavallisesti sitä voidaan hyödyntää pohjakuormana, joka vähentää veden esilämmitystarvetta.

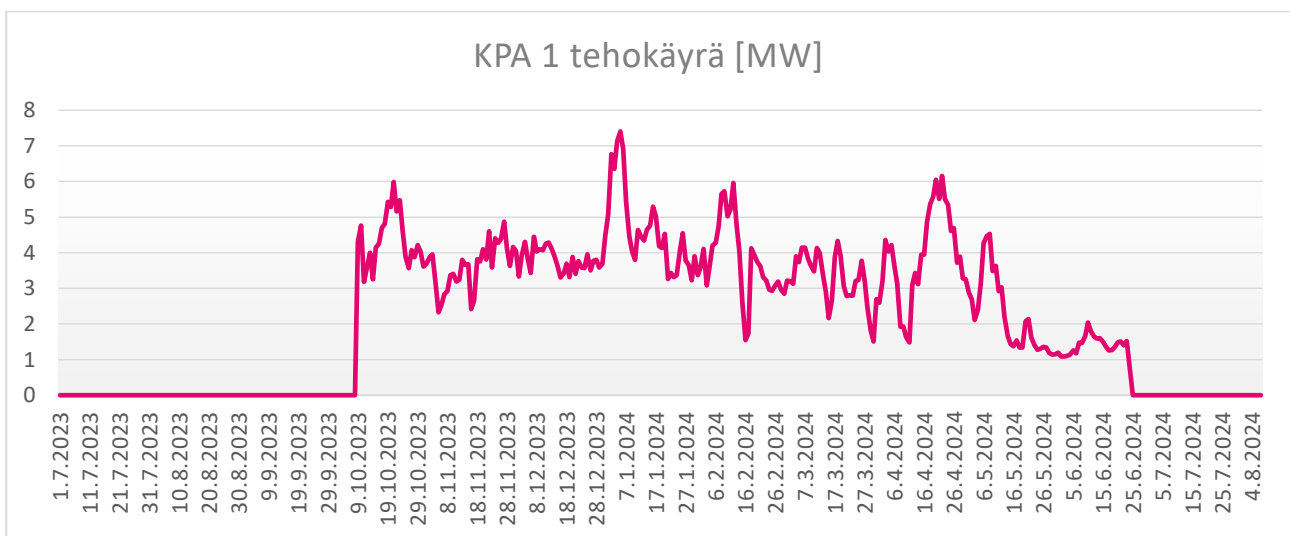
Talvikaudella datakeskuksen hukkalämpö ei yksinään kykene vastaamaan kasvaneeseen tehontarpeeseen, mutta sen merkitys peruslämmön tuottajana korostuu. Tuottamalla vakaata pohjakuormaa datakeskus vähentää polttavien KPA-laitosten kuormitusta ja erityisesti niiden veden esilämmitystarvetta. Tämä lisää lämmöntuotannon energiatehokkuutta ja pienentää polttoainekulutusta.

Kaiken kaikkiaan datakeskuksen hukkalämmöstä saadaan hyötyä ympäri vuoden, vaikka sen rooli vaihtelee kesäajan pääasiallisesta lämmönlähteestä talvikauden tukituottajaksi, joka vakauttaa järjestelmän toimintaa ja parantaa sen kokonaisvarmuutta.

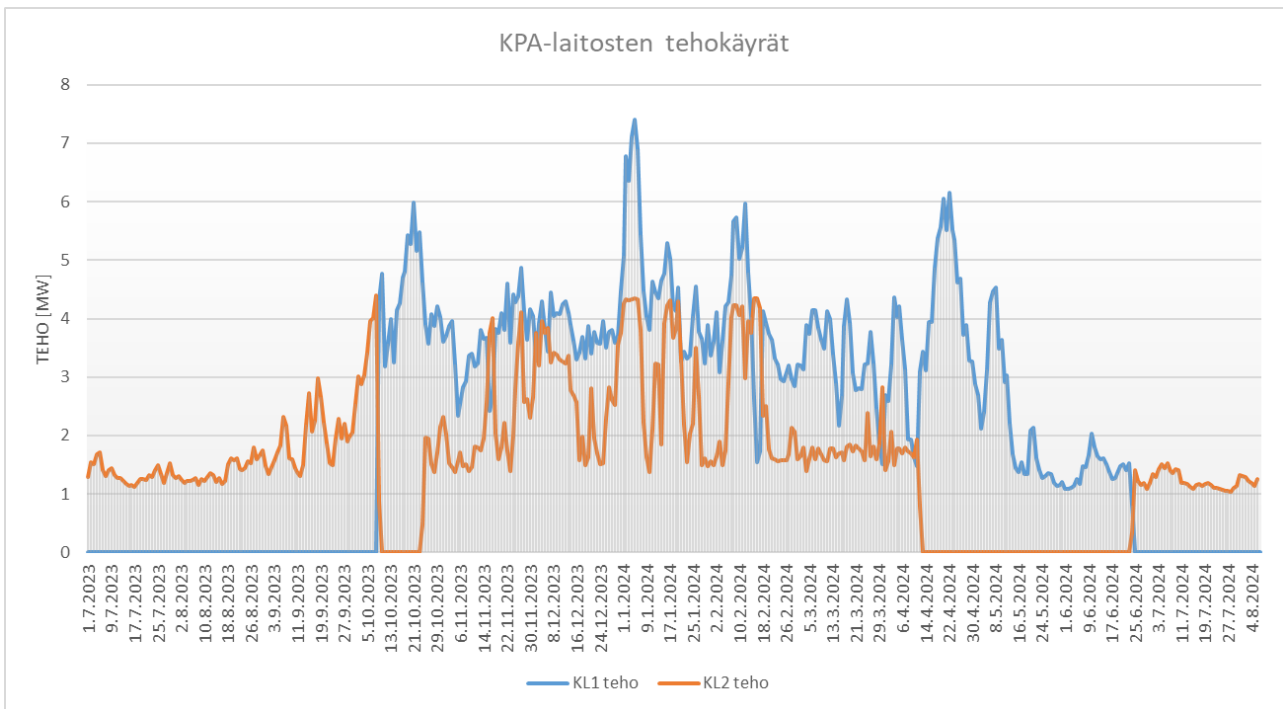
Kuvioissa 6, 7 ja 8 on esitetty KPA-laitosten päivittäisestä ja tuntikohtaisesta energiantuotannosta lasketut keskimääräiset tehokäyrät. Koska Saarijärvi on mittakaavaltaan pieni kaupunki, jonka kaukolämpöverkossa ei tyypillisesti esiinny kesäaikana merkittäviä, äkillisiä tai jyrkkiä kulutuspiikkejä, keskiarvoistettu trendianalyysi antaa sen kohdalla lämmön kulutuksen ja tuotannon perusluonteesta riittävän tarkan kuvan.



Kuvio 6. KPA 2 tehokäyrä



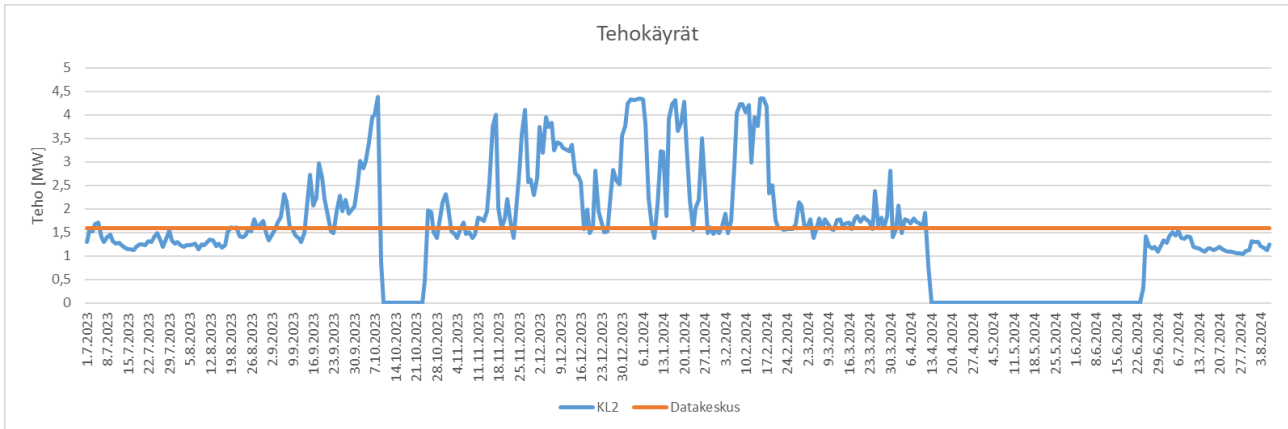
Kuvio 7. KPA 1 tehokäyrä



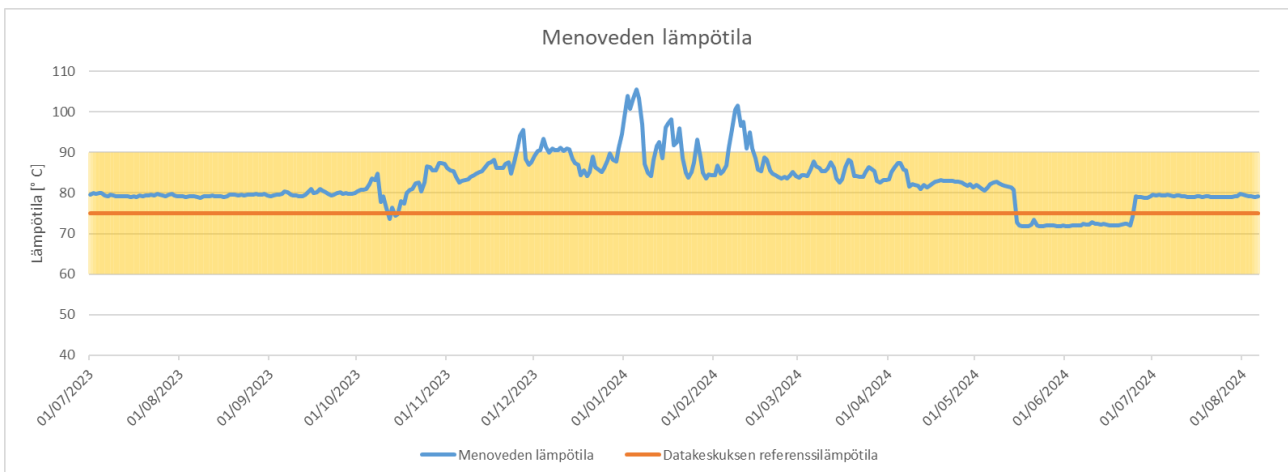
Kuvio 8. KPA-laitosten tehokäyrät

Datakeskuksen nimellisteho on esitetty kuviossa 9, jossa sitä verrataan KPA 2 -laitoksen tuotantoon. Kuviossa 10 verrataan puolestaan datakeskuksen lupaaman veden lämpötilaa kaukolämpöverkon nykyisen menoveden lämpötilaan. Jälkimmäisestä nähdään, että veden referenssilämpötila jää paikoin hieman sen tason alle, mitä kaukolämpöverkko on pyytänyt. Tämä tilanne saattaa edellyttää priimauslämmön tuottamista optimaalisen toimituslämpötilan saavuttamiseksi.

On kuitenkin mahdollista, että kesäaikana, ulkoilman lämpötilan noustessa, datakeskuksen lämmöntuotanto pysyttelee kuvioon 10 keltaisella merkityn vaihteluvälin huipulla. Tämä voisi potentiaalisesti mahdollistaa kaukolämpöverkon ajamisen kokonaan datakeskuksen tuottamalla hukkalämmöllä, vähentäen tarvetta muulle energiantuotannolle.



Kuvio 9. Tehokäyrät KPA 2 ja datakeskus



Kuvio 10. Kaukolämpöverkon menoveden lämpötilä

8 Kustannusvaikutukset

Jos datakeskuksen oletetaan tuottavan hukkalämpöä jatkuvasti 1,6 megawatin nimellisteholla, sen vuotuinen lämmöntuotanto on 14 016 MWh, joka vastaa n. 37 % Saarijärven Kaukolämmön vuoden 2024 kokonaistuotannosta (Saarijärven Kaukolämpö Oy 2025). Vertailun vuoksi saman hukkalämmön tuottaminen yksittäisillä polttoaineilla vaatisi n. 5 000 tonnia turvetta, 5 300 tonnia haketta tai 1 170 tonnia kevyttä polttoöljyä. Tarkemmat laskelmat taloudellisten tietojen kera esitetään salatussa liitteessä (Liite 1).

Polttoaineen käytön vähentyessä myös sen hankinta-, kuljetus- ja varastointitarve pienenee, mikä vähentää kustannuksia entisestään. Lisäksi polttavien laitosten käyttöasteen pienentyminen vähentää niiden mekaanista kulumista ja huoltotarvetta, mikä pidentää laitteiston käyttöikää. Kokonaisuudessaan datakeskuksen tuottama lämpö vaikuttaisikin tukevan merkittävästi Saarijärven kaukolämmön tuotannon taloudellista ja teknistä kestävyyttä, sekä edistävän siirtymistä kohti vähäpäästöisempää energiantuotantoa.

9 Ympäristövaikutukset

Kaukolämpö on ympäristön kannalta edullinen vaihtoehto etenkin silloin, kun se perustuu yhteistuotantoon (CHP), jossa sekä sähköä että lämpöä tuotetaan samasta polttoaineesta. Niiden erilliseen tuotantoon verrattuna se parantaa hyötysuhdetta ja vähentää haitallisia päästöjä, koska yhteistuotannolla samasta polttoainemäärästä saadaan enemmän hyötyenergiaa. Lisäksi kaukolämpölaitokset voivat käyttää biomassan tai biokaasun kaltaisia uusiutuvia polttoaineita, mikä vähentää lämmöntuotannon hiilijalanjälkeä entisestään. (Mäkelä & Tuunanen 2015.)

Välillisesti kaukolämpö vähentää myös liikenteestä aiheutuvia päästöjä, kun polttoaineita kuljetetaan suuria määriä suoraan voimalaitoksille sen sijaan, että pienet toimituserät jaettaisiin yksittäisiin taloihin. Keskitetty lämmöntuotanto mahdollistaa myös tehokkaan savukaasujen puhdistuksen, koska toisin kuin yksittäisten rakennusten pienkattiloissa, kaukolämpölaitoksilla on korkeat savupiiput, joihin voidaan asentaa monipuolisia puhdistuslaitteita, mikä vähentää ilman epäpuhtauksia. Esimerkiksi Helsingissä ilmanlaatu on kaukolämmön ansiosta parantunut huomattavasti, mistä kaupunki on saanut jopa YK:n ympäristöpalkinnon (mt).

Kaukolämmön tuotannosta syntyvät päästöt aiheutuvat enimmäkseen polttavien menetelmien käyttämisestä polttoaineista, joiden palamisessa vapautuva energiamäärä riippuu suurilta osin niiden sisältämästä hiilestä ja vedystä (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2000, 197). Polttamisessa muodostuu vettä, hiilidioksidia, lämpöä ja päästöjä, joiden määrä ja laatu riippuu pääosin käytetystä tuotantotekniikasta ja polttoaineen koostumuksesta. Esimerkiksi tuhka ja kosteus vaikuttavat lämpöarvoa alentavasti. (Vu 2021, 13.)

Taulukossa 1 esitellään Saarijärven Kaukolämmön käyttämien polttoaineiden ominaisuuksia.

Polttoaine	Lämpöarvo GJ/t	kg / MWh	Päästökerroin t/TJ CO ₂
Jyrsinturve	10,1	356,4	107,6
Kokopuu- tai rankahake	9,5	378,9	112,0
Kevyt polttoöljy	43,2	83,3	73,0

Taulukko 1. Polttoaineiden ominaisuuksia (Tilastokeskus 2025)

Talvikaudella Saarijärvellä käytetään polttoaineena pääasiassa turvetta. Tämä johtuu siitä, että hakkeen polttamiseen liittyy useita teknisiä ja toiminnallisia riskejä erityisesti kylmissä olosuhteissa. Hake on ensiksikin altis jäätymään kuljettimille ja siirtolaitteisiin, mikä voi aiheuttaa tuotantokatkoja ja lisätä kunnossapitotarvetta. Toiseksi hakkeen lämpöarvo on turvetta alhaisempi, minkä vuoksi sillä ei saavuteta yhtä korkeita tehoja etenkin silloin, kun lämmöntarve on suurimmillaan. Hake sisältää usein myös maa-aineksia ja epäpuhtauksia, jotka voivat aiheuttaa sintraantumista, eli paakkuuntumista polttopedin hiekkaan ja lämmönsiirtopinnoille. Tämä heikentää lämmönsiirtoa kattilan seinämiin ja saattaa edellyttää hiekan vaihtamista tavanomaista useammin. Äärimmillään kattila joudutaan tällöin ajamaan alas puhdistusta varten, mikä ei ole toivottavaa varsinkaan keskitalven korkeiden kuormitusjaksojen aikana (Spliethoff 2010, 326, 335, 505). Näistä syistä hake soveltuu parhaiten kesä- ja siirtymäkausien polttoaineeksi, kun taas talvikaudella turve tarjoaa toimintavarmemman ja tehokkaamman ratkaisun.

Kaukolämmön tuotannosta aiheutuvat hiilidioksidin kokonaispäästöt voidaan laskea kaavalla 3

$$E_T = \sum EF_f \cdot C_f \quad (3)$$

missä

E_T = polttoaineiden kokonaispäästöt

EF_f = polttoaineen päästökerroin

C_f = polttoaineen kulutus

Päästöt saadaan siis yksinkertaisesti laskemalla yhteen kunkin käytetyn polttoaineen päästöt. Kun päästökertoimet määräytyvät Tilastokeskuksen vuosittain julkaiseman polttoaineluokituksen (Tilastokeskus 2025) mukaisesti, käytännössä ainoat lopputulokseen vaikuttavat muuttujat ovat käytetyt polttoaineet ja niiden kulutus.

Esimerkiksi Saarijärven Kaukolämpö Oy:n vuoden 2023 laskennalliset päästöt voidaan selvittää Tilastokeskuksen ja Energiateollisuus ry:n tiedoista (Kaukolämpötilasto 2025) hyödyntäen määritelmää 1 GWh = 3,6 TJ seuraavasti:

Polttoaine	Tuotanto GWh	Tuotanto TJ	Päästökerroin t/TJ CO₂	Päästöt CO₂ t
Jyrsinturve	28,3	101,9	107,6	10 964,4
Kokopuu- tai rankahake	10,5	37,8	112,0	4 233,6
Kevyt polttoöljy	0,6	2,2	73,0	158,4
Lämmön talteenotto tai lämpöpumpun tuotanto	7,6	27,4	-	-
Yhteensä	47	169,3	-	15 356,4

Taulukko 2. Tuotantomäärät ja päästöt 2023

Tämä suuntaa antava laskelma olettaa sekä käytetyn polttoaineen puhtauden että polton hyötysuhteen olevan tasan 100 %, mikä ei käytännössä koskaan toteudu. Tällä tavoin saadut 15 356 tonnin CO₂-päästöt ovat siis teoriassa mahdolliset mutta kuitenkin epärealistiset. Virallisissa yhteyksissä käytetäänkin Energiateollisuuden kaukolämmön päästölaskurin (www.klpaastolaskuri.fi) lukuja, joissa huomioidaan todellisen tilanteen lisäksi myös muun muassa lämmön talteenotosta koituvat hyödyt. Sen mukaiset kokonaispäästöt olivat noin 11 112 tonnia, eli kuitenkin suunnilleen samaa suuruusluokkaa kuin esitetty karkeampi arvio.

Kun kaukolämmön nykyisen tuotannon päästöjä verrataan mallinnettuun tilanteeseen, jossa osa lämmöstä tuotettaisiin datakeskuksen hukkalämmöllä ja sähkökattilalla, käy ilmi, että vuotuiset hiilidioksidipäästöt vähenisivät lähes 5 600 tonnia. Tämä vastaa noin 50 prosentin vähennystä kokonaispäästöissä.

Siirtyminen kesäkaudeksi polttavasta tuotannosta hukkalämpöön ja sähkökattilaan perustuvaan ratkaisuun tekisi kaukolämmöntuotannosta käytännössä päästötöntä, olettaen että sähkö tuotettaisiin uusiutuvilla energialähteillä. Samalla myös välilliset päästöt vähenisivät merkittävästi, sillä polttoainehankintojen väheneminen pienentäisi kuljetuksiin, logistiikkaan ja varastointiin liittyviä päästöjä.

Datakeskuksen tuottaman lämpöenergian kokoluokkaa voi havainnollistaa seuraavasti: Vuonna 2024 uusien omakotitalojen keskikoko oli noin 175 kerros-m² ja vuoden keskimääräinen lämmöntarve 130–140 kWh/m², sisältäen huonetilojen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden (Uusien omakoti- ja paritalojen pinta-ala n.d.; Suuntaa-antavia ohjearvoja. 2020). Datakeskuksen lämpöenergia riittäisi siis noin 600 talon lämmitykseen vuodessa.

10 Tulosten tarkastelu ja työn eettisyys

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää datakeskuksen hukkalämmön hyödyntämistä Saarijärven kaukolämpöverkossa taloudellisesta, teknisestä ja ympäristövaikutusten näkökulmasta. Työn laskelmat ja johtopäätökset perustuvat osittain toimeksiantajalta saatuun salassa pidettävään tuotanto- ja kulutusdataan sekä vertailuun nykyisen ja suunnitellun tuotantomuodon välillä, osittain muihin lähteisiin. Aineiston ja mittaustietojen vaihtelevasta tarkkuudesta johtuen laskelmissa on jouduttu tekemään joitakin oletuksia, minkä vuoksi niitä voi pitää pikemminkin valistuneina hypoteeseina kuin ehdottomana totuutena. Niiden antama kokonaiskuva hankkeen toteutettavuudesta on kuitenkin realistinen ja linjassa hankkeen alkuperäisten laskelmien kanssa.

Taloudellisesta näkökulmasta investointi on selkeästi kannattava. Datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen vähentää vuosittaisia lämmöntuotantokustannuksia jo pelkän polttoaineen osalta noin 11 %, minkä lisäksi merkittäviä välillisiä säästöjä saadaan laitosten mekaanisen kulumisen vähenemisestä ja huoltotarpeen pienentymisestä, sekä polttoainekuljetusten ja tuhkanpoiston

logististen kustannusten alenemisesta. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus tekee hankkeesta taloudellisesti houkuttelevan, sekä pitkällä aikavälillä myös riskienhallinnan näkökulmasta perustellun investoinnin.

Teknisen toimivuuden osalta voidaan todeta datakeskuksen hukkalämmön kattavan kesän lämmöntarpeesta merkittävän osan vaan ei kaikkea. Sen rinnalle tarvitaan sähkökattila etenkin menoveden lämpötilan priimaamiseen, jotta verkoston veden lämpötila saavuttaa vaaditun tason. Talvikaudella datakeskus toimii tehokkaana pohjakuorman tuottajana, mikä vähentää KPA-laitokselta veden esilämmitystarvetta ja tasoittaa verkon kuormitusta. Tämä tukee sekä tuotannon joustavuutta että laitosten käyttöikä.

Ympäristövaikutuksia tarkastellessa hankkeella on merkittävää potentiaalia päästövähennysten suhteen. Arvion mukaan datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen vähentäisi hiilidioksidipäästöjä noin 50 %, mikä vastaa noin 5 600 tonnia vuodessa. Tämä tukee vahvasti Saarijärven Kaukolämpö Oy:n tavoitetta vähäpäästöisemmästä energiantuotannosta ja on linjassa kansallisten sekä EU:n hiilineutraaliustavoitteiden kanssa.

Kaiken kaikkiaan hukkalämpöhanke voidaan arvioida taloudellisesti kannattavaksi, teknisesti toteuttamiskelpoiseksi ja ympäristön kannalta erittäin positiiviseksi. Mikäli se toteutuu suunnitellusti, tulevaisuudessa voisi ajatella otettavaksi käyttöön vielä lisämittauksia ja reaaliaikaista seuranta, jotka mahdollistaisivat tuotannon entistä tarkemman optimoinnin sekä täsmällisemmät arviot datakeskuksen vaikutuksesta koko verkoston energiatehokkuuteen.

Työn tavoitteena oli edistää toimeksiantajan siirtymää kohti energiatehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää kaukolämmön tuotantoprosessia. Siinä noudatettiin JAMKin ohjeistuksen lisäksi Tutkimuseettisen neuvottelukunnan hyvän tieteellisen käytännön periaatteita (<https://tenk.fi/fi/ohjeet-ja-aineistot/HTK-ohje-2012>).

Lähdeaineiston luotettavuutta arvioitiin vertailemalla sitä mahdollisuuksien mukaan vastaavaan aineistoon, tai pyytämällä toimeksiantajan edustajaa selittämään mahdollisesti löytyneitä epäselvyyksiä. Kirjallisten lähteiden viittaukset merkittiin asianmukaisesti, ja sähköpostikeskusteluiden osien julkaisemiseen pyydettiin luvat.

Laskelmat ja johtopäätökset pyrittiin tekemään huolellisesti ja tarkasti omat puutteet tunnistaen. Epävarmoissa tilanteissa kysyttiin neuvoja, salassa pidettävää tietoa kuitenkin vaarantamatta, ja saatuja tuloksia verrattiin toimeksiantajan aiempiin alustaviin laskelmiin niiden oikeasuuntaisuuden varmistamiseksi.

Energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävä toimeksianto itsessään oli linjassa sekä EU:n uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä annetun direktiivin (Direktiivi 2018/2001/EU 2018), että YK:n kestävän kehityksen tavoitteiden kanssa (<https://www.yk-liitto.fi/kestava-kehitys>).

11 Pohdinta ja jatkokehitys

Datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen Saarijärven kaukolämpöverkossa vaikuttaa tällä hetkellä taloudellisesti kannattavalta ja teknisesti toimivalta ratkaisulta, mutta sen pitkäaikainen menestys riippuu useista ulkoisista tekijöistä. Merkittävin epävarmuustekijä liittyy sähkön hinnan kehitykseen. Mikäli sähkön hinta nousee voimakkaasti tai sähkönkulutus kasvaa Suomessa tuotantoa nopeammin, voi se heikentää hankkeen taloudellista kannattavuutta. Datakeskustoiminnan kannalta edullisesta sähköstä luopuminen voisi tarkoittaa myös päätöstä rajoittaa tai lopettaa lämmöntuotannon myynti kaukolämpöverkkoon, mikä vaikuttaisi verkoston lämmöntuotannon kokonaisrakenteeseen.

Teknisen kehityksen näkökulmasta lämpöpumpputeknologian hyödyntäminen avaa merkittäviä mahdollisuuksia. Tulevaisuudessa lämpöpumpuilla voitaisiin parantaa lämmön priimausta ja siten kasvattaa hukkalämmön hyödyntämisastetta energiatehokkaammin kuin sähkökattilalla. Tästä olisi hyötyä erityisesti tilanteissa, joissa pelkällä datakeskuksen hukkalämmöllä ei saavuteta verkoston menovedeltä vaadittua lämpötilaa.

Ympäristön ja energiamarkkinoiden kannalta datakeskuksen hukkalämmön hyödyntäminen tukee Suomen pitkän aikavälin hiilineutraaliustavoitteita. Tulevaisuudessa olisi kuitenkin syytä tarkastella, kuinka datakeskusten tuottamaa lämpöä voitaisiin yhdistää muihin uusiutuviin energiamuotoihin, kuten biokaasuun, aurinkolämpöön tai geotermiseen energiaan. Tällainen hajautettu tuotantomalli voisi lisätä verkoston joustavuutta entisestään ja vähentää riippuvuutta yksittäisestä tuotantoyksiköstä.

Säätösähkömarkkinat ovat niin laaja ja monitasoinen kokonaisuus, että niiden tarkastelu ei mahtunut tämän opinnäytetyön rajauksiin. Aihe olisi kuitenkin erinomainen jatkotutkimuksen kohde, sillä datakeskuksilla lienee tulevaisuudessa potentiaalia toimia osana sähköjärjestelmän joustoa ja tasapainotusta.

Jatkossa tutkimusta olisi syytä laajentaa käytännön toteutuksen suuntaan, kun datakeskus saadaan liitettyä verkkoon ja ensimmäinen käyttökausi on takana. Reaaliaikainen mittausdata mahdollistaisi tarkemman analyysin datakeskuksen todellisesta lämmöntuotannosta ja priimaustarpeesta sekä sen vaikutuksesta polttoaineen kulutukseen. Tämä olisi luonnollinen jatko tämän opinnäytetyön toimintatutkimukselliselle lähestymistavalle ja toisi arvokasta vertailutietoa myös tulevia investointeja varten.

Toinen kiinnostava jatkotutkimuksen aihe voisi olla lämpövarastoinnin ja lämpöpumpputeknologian yhdistäminen datakeskuksen lämmöntuotantoon. Tällöin voitaisiin kehittää dynaaminen sää- ja kulutusperusteinen ohjausjärjestelmä, joka optimoi lämmön varastoinnin ja verkkoon syötön kustannustehokkaasti.

Lopuksi tämä pilottiprojekti voi toimia pohjana laajemmalle energiasiirtymää tukevien konseptien kehitykselle ja mallina siitä, kuinka datakeskukset ja kaukolämpöjärjestelmät voivat muodostaa yhteisen, resurssitehokkaan ja päästöttömän energiajärjestelmän.

Lähteet

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia.

Bean, R., Olesen, B., Kwang, W. & Kim, K.-W. 2010. Part 1. history of radiant heating & cooling systems. *Ashrae journal*. Viitattu 3.5.2025. https://www.researchgate.net/publication/293488137_Part_1_History_of_Radiant_Heating_Cooling_Systems.

Code of Practice for the Safe Operation of Electric Steam Boilers. 2013. Hong Kongin työvoimaviraston sivusto. Viitattu 25.9.2025. <https://www.labour.gov.hk/eng/public/bpvd/boiler.pdf>.

Collins, J.F. Jr. 1959. The history of district heating. *District heating*, XLIV, 4. Viitattu 3.5.2025. <http://waterworkshistory.us/DH/1959History.pdf>.

Danish Board of District Heating 2022. District heating history. Viitattu 3.5.2025. <https://dbdh.org/district-heating-history/>.

Datakeskusten hukkalämmöissä piilee huikea potentiaali. 2023. Artikkelij Granlund.fi:n verkkosivuilla. Viitattu 10.2.2025. <https://www.granlund.fi/uutinen/datakeskusten-hukkalammoissa-piilee-huikea-potentiaali/>.

Direktiivi 2018/2001/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi. 11.12.2018. Viitattu 10.2.2025. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02018L2001-20240716>.

Dubrana, E. 2025. Vastaus kyselyyn. Sähköpostiviesti 9.5.2025. Vastaanottaja R. Roponen. EDDU Energyn toimitusjohtajan näkemyksiä Suomesta, Saarijärvestä ja yhteistyöhankkeesta.

EDDU Energy. N.d. Yrityksen sivusto. Viitattu 20.5.2025. <https://edduenergy.com/>.

Electrode Boiler Installation, Operation, and Maintenance. 2013. Sähköinen opas kattilahuoneratkaisuja tarjoavan Waterloo Manufacturingin sivustolla. Viitattu 25.9.2025. <https://watmfg.com/watmfg23082016/wp-content/uploads/2016/09/Electrode-Operation-and-Maintenance-Manual.pdf>.

Geothermal-DHC 2021. Chaudes-Aigues: The first documented geothermal district heating system in France. Viitattu 3.5.2025. <https://www.geothermal-dhc.eu/News/Details?id=20>.

Hakala, J. 2022. Lämmön varastointiratkaisujen kartoitus ja niiden teknistaloudelliset arviot Pori Energia Oy:n kaukolämpöverkossa. LUT-yliopisto. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164492/Kandidaatintyo_Hakala_Juho.pdf.

Hänninen, E. 1991. Saarijärven Kaukolämpö Oy 30 vuotta. Saarijärven Kaukolämpö Oy. Saarijärvi.

Järvenreuna, J. 2014. Savukaasupesuri parantaa lämpöyhtiön kannattavuutta. *Promaint*, 28, 5, 18–20.

Kananen, J. 2014. Toimintatutkimus kehittämistutkimuksen muotona: Miten kirjoitan toimintatutkimuksen opinnäytetyönä? Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Jyväskylä.

Kaukolämpötilasto. 2025. Energiateollisuuden kaukolämpötilasto. Viitattu 25.9.2025. <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>

Kaukolämpövuosi 2024. 2025. Energiateollisuuden laatimat tilastot kaukolämmön käytöstä vuonna 2024. Viitattu 10.2.2025. https://energia.fi/wp-content/uploads/2025/01/Kaukolampovuosi-2024_ennakkograafit.pdf.

Kauppinen, E. 2021. Pitäjän oma lämmöntuottaja ja yksi alansa pioneereista. Saarijärven Kaukolämpö Oy. Saarijärvi.

Koskelainen, L., Saarela, R ja Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki. Libris Oy.

Mäkelä, V.-M. ja Tuunanen, J. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin Ammattikorkeakoulu.

Nordic Tec 2025. The history of district heating and urban networks. Viitattu 3.5.2025. <https://norditect-store.com/gb/blog/post/the-history-of-district-heating-and-urban-networks>.

Pernaa, J. 2013. Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä. PS-kustannus.

Pierce, M.A. 2025. History of district heating in the United States. Viitattu 3.5.2025. <http://waterworkshistory.us/DH>.

Rämä, M. & Klobut, K. 2020. Hukkalämpö kaukolämpöjärjestelmissä. Asiakasraportti Työ- ja elinkeinoministeriön sivuilla. Viitattu 10.2.2025. <https://tem.fi/documents/1410877/2132212/Hukkalampo+kaukolampojarjestelmissa+maarittely+ja+luokittelu+VTT+2020.pdf/10bfab6c-ae5a-8a68-5926-5a98abab062f/Hukkalampo+kaukolampojarjestelmissa+maarittely+ja+luokittelu+VTT+2020.pdf>.

Saarijärven Kaukolämpö Oy toimintakertomus 2024. N.d. Toimeksiantajan vuosikertomus heidän nettisivuillaan. Viitattu 8.5.2025. https://saaveka.fi/wp-content/uploads/2025/04/Toimintakertomus_2024_Kaukolampo.pdf.

Sopimus. N.d. Energiatehokkuussopimus Energiatehokkuussopimusten nettisivuilla. Viitattu 10.2.2025. <https://energiatehokkuussopimukset2017-2025.fi/sopimus>.

Spliethoff, H. 2010. Power Generation from Solid Fuels. Berlin: Springer.

Suuntaa-antavia ohjearvoja. 2020. Artikkelit energiatehokaskoti.fi:n verkkosivuilla. Viitattu 17.11.2025. https://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/hyva_tietaa/suuntaa-antavia_ohjearvoja.

The Holly Steam Combination Company 1878. The holly system of steam heating for cities and villages through pipes laid in the public streets. Viitattu 3.5.2025. <https://archive.org/details/HollySteamCombinationCo.CCA90B415pdf/mode/2up>.

Tilastokeskus. 2025. Polttoaineluokitus. Viitattu 25.9.2025. https://stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html.

Tukes. 2025. Korjaus- ja muutostyön asiakirjat. Viitattu 25.9.2025. <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteiden-korjaus-ja-muutostyot#korjaus-ja-muutostyon-asiakirjat>.

Uusien omakoti- ja paritalojen pinta-ala. N.d. Artikkelit pientaloteollisuus.fi:n verkkosivuilla. Viitattu 17.11.2025. <https://pientaloteollisuus.fi/keskimaarainen-omakotitalo/pinta-ala>.

Vihavainen, L. 2025. Kaukolämmön sukupolvet. Aalto-yliopisto. Viitattu 5.6.2025. <https://aalto-doc.aalto.fi/items/981a4e05-0e3d-4719-8ed1-0c8daff267d7>.

Vu, T. 2021. Kaukolämpö Suomessa ja sen tuotannon ja kulutuksen arviointi eri rakennustyypeissä. Aalto-yliopisto. Viitattu 12.11.2025. <https://aalto-doc.aalto.fi/bitstreams/50796169-e124-47a5-a176-d5e1994f3366/download>.

Yritys. N.d. Yritysesittely Saarijärven Kaukolämpö Oy:n sivustolla. Viitattu 16.5.2025. <https://saaveka.fi/kaukolampo/yritys>.

Liitteet

Liite 1. Ympäristö- ja kustannusvaikutukset (Salassa pidettävä)