



DIGITAALISEN KAKSOSEN KÄYTTÖ KAUKOLÄMPÖVERKON KEHITTÄMIS- SESSÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2024

Petri Lähde

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

TkT Jussi Saari

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Petri Lähde

Digitaalisen kaksosen käyttö kaukolämpöverkon kehittämisessä

Energiatekniikan diplomityö

2024

67 sivua ja 29 kuvaa

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen ja TkT Jussi Saari

Avainsanat: Digitaalinen kaksonen, kaukolämpö, optimointi, Gradyent

Lähes puolet suomalaisista asuu kaukolämmitetyissä taloissa. Kaukolämpöverkkojen lämmöntuotantomuodot monipuolistuvat, verkkojen koko kasvaa ja häviöitä pyritään vähentämään. Lisäksi on lämpövarastoja ja muuttuvia kustannuksia. Näiden optimaalinen hallinta käyttäjille vaikeutuu jatkuvasti. Avuksi on kehitetty kaukolämpöverkon digitaalinen kaksonen. Se on verkon digitaalinen malli, jota täydennetään reaaliaikaisella mittaustiedolla.

Työssä perehdytään Vatajankoski Oy:lle hankittuun Gradyentin digitaaliseen kaksoseen. Järjestelmä toimii pilvessä ja suurimmat hidasteet käyttöönotossa liittyivät tietoturvan lisäksi valtavaan datamäärään eri tuotantolaitoksista ja asiakkailta. Järjestelmän käyttöönoton aloitus myöhästyi yli puoli vuotta. Diplomityön päättyessä järjestelmän käyttöönotto on edelleen pieniltä osin kesken, mutta saadaan kuntoon kevään 2024 aikana. Tilaajan ja toimittajan välinen viestintä epäonnistui joiltain osin eikä kaikkia toivottuja ominaisuuksia saatu heti käyttöön. Tilaaja joutuu odottamaan simulointiominaisuuksia määrittelemättömän ajan.

Jokapäiväisessä käytössä hyödynnetään runsaasti lämpökarttoja, joilla nähdään nopeasti verkon eri osien tilanteet. Lisäksi hyödynnetään historiatietoja verkoston ongelmien selvityksessä ja ennusteita tuotannon optimointiin. Verkoston optimointi toteutuu automaattisesti pilvessä. Digitaalinen kaksonen voi projektin valmistuttua ohjata tuotantoa ja haluttaessa kulutustakin ennusteiden perusteella. Sillä on jo nyt löydetty useita verkoston pullonkauloja ja parannuskohteita, jotka korjaamalla säästetään energiaa ja rahaa. Mitä suuremmissa verkoissa vastaavia järjestelmiä otetaan tulevaisuudessa käyttöön, sitä suurempia säästöjä saadaan aikaan.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Petri Lähde

Usage of digital twin in the development of district heating network

Master's thesis

2024

67 pages and 29 figures

Examiners: Professor, D.Sc. (tech.) Esa Vakkilainen and D.Sc. (tech.) Jussi Saari

Keywords: Digital Twin, district heat, optimisation, Gradyent

Almost half of Finns live in district heating homes. The forms of heat production in district heating networks are becoming more diverse, increasing in size, and aiming to reduce losses. In addition, there are heat storage facilities and variable costs. Optimal management of these is becoming increasingly difficult for users. A Digital Twin of the district heating network has been developed to help with these problems. It is a digital model of the network supplemented by real-time measurement data.

The thesis describes the Gradyentin Digital Twin purchased by Vatajankoski Oy. The system operates in the cloud, and the main obstacles in the implementation were not only data security, but also the huge amount of data from different production plants and customers. The deployment was delayed by more than six months. By the end of this thesis, the deployment of the system is still incomplete in small parts but will be completed in the spring of 2024. Communication between the customer and the supplier failed in some areas and not all the desired features were immediately available. The customer will have to wait for an unspecified period of time for simulation features.

In everyday use, thermal maps are widely used to quickly see the situation in different parts of the network. Historical data is also used to locate network problems and forecasts are used to optimise production. Heating network optimisation takes place automatically in the cloud. Once the project is complete, the digital twin can control production and also consumption based on forecasts if necessary. It has already identified several bottlenecks and improvement points in the network, which will save energy and money when repaired. The larger the networks where similar systems are deployed in the future, the greater the savings.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AI	Tekoäly (Artificial Intelligence)
BIM	Rakennustietomallinnus (Building Information Modeling)
CAD	Tietokoneavusteinen suunnittelu (Computer Aided Design)
CHP	Lämmön ja sähkön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
IoT	Esineiden internet (Internet of Things)
LNG	Nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
LPG	Nestekaasu, propaanin ja butaanin seos (Liquefied Petroleum Gas).
ML	Koneoppiminen (Machine Learning)
NASA	Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintovirasto (National Aeronautics and Space Administration)
NFC	Lyhyen kantaman langaton tiedonsiirto (Near Field Communication)
NIS	Verkkotietojärjestelmä (Network Information System)
NPSH	Pumpun imukorkeus (Net Positive Suction Head)
REF	Esikäsitelty kierrätyspolttoaine (REcovered Fuel)
RFID	Radiotaajuustunniste (Radio Frequency Identification)
WHP	Hukkalämpölaitos (Waste Heat Plant)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
1.1	Työn tausta	7
1.2	Tavoitteet.....	7
1.3	Menetelmät.....	8
2	Kaukolämpöjärjestelmä	9
2.1	Kaukolämmön tuotantoluvut.....	11
2.2	Kaukolämpöverkko	14
2.2.1	Kaukolämmön pumppaus	15
2.2.2	Lämpöhäviöt	16
2.2.3	Painehäviöt.....	17
2.3	Kaukolämpövoimalat	18
2.3.1	Yhteistuotanto	18
2.3.2	Kombivoimala	20
2.3.3	Moottorivoimala	21
2.4	Lämpökeskukset.....	23
2.5	Sähkökattilat.....	24
2.6	Lämmön varastointi	25
2.7	Kaukolämmöntuotannon polttoaineet	27
3	Vatajankoski Oy:n esittely	30
3.1	Kaukolämpöjärjestelmän esittely	31
3.2	Kaukolämpövoimala	32
3.3	Muut varalämpökattilat	33
3.4	Pansian lämmöntalteenottolaitos.....	34
3.5	Datalämpö	35
3.6	Hiekkalämpövarasto.....	37
3.7	Kaukokylmäjärjestelmä.....	39

4	Digitaalinen kaksonen	40
4.1	Digitaalinen kaksonen yleisesti	40
4.2	Päätyypit.....	42
4.3	Rakennustietomallinnus (BIM).....	44
4.4	Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä	45
4.5	Esineiden internet.....	46
4.6	Tekoäly ja koneoppiminen	47
4.7	Gradyentin lyhyt yritysesittely	48
4.8	Gradyentin digitaalinen kaksonen.....	49
4.9	Digitaalinen kaksonen Helenin käytössä	49
5	Digitaalinen kaksonen Vatajankoski Oy:n käytössä	52
5.1	Tietojärjestelmän kuvaus	52
5.2	Karttapohjan lämpökartat.....	54
5.3	Tuotantolaitoskohtaiset tiedot	56
5.4	Asiakaskohtaiset tiedot.....	58
5.5	Tuotannon optimointi.....	59
5.5.1	Tuotannon lämpötilaoptimointi	60
5.5.2	Kaukolämpöverkon virtauksen optimointi	61
5.6	Muita ominaisuuksia	61
6	Johtopäätökset	63
	Lähteet	65

1 Johdanto

Kaukolämpöverkkojen energiapaletti monipuolistuu ja lämpöakkujen käyttö lisääntyy. Energian hinnassa on nähty suurta vaihtelua vuonna 2022 alkaneen Ukrainan sodan jälkeen, eikä kulutuskaan ole koskaan tasaista. Energian tuotannon optimointi on entistä hankalampaa lukuisten tuotantomuotojen ja lämmön varastoinnin lisääntyessä. Verkon käyttäjän on entistä vaikeampaa tehdä optimaalisia valintoja energian tuotannon suhteen, joten tähän ongelmaan haetaan apua laskentamalleista ja tekoälystä. Kankaanpäässä kaukolämpöverkoston omistava Vatajankoski Oy on ottanut käyttöön kaukolämpöverkon simulointimallin eli digitaalisen kaksosen. Tässä työssä selvitetään digitaalisen kaksosen hyötyjä verkon kehittämisessä ja käytössä.

1.1 Työn tausta

Vatajankoski Oy on Pohjois-Satakunnassa toimiva energiayhtiö, joka on kolmantena kaukolämpöyhtiönä Suomessa ottamassa käyttöön Gradyentin tekemän kaukolämpöverkon digitaalisen kaksosen. Tähän kaksoseen mallinnetaan Kankaanpään kaupungin kaukolämpöverkko. Verkossa on tuotantoa perinteisen CHP-voimalan lisäksi kaasukattiloilla, öljykäyttöisillä huippukuormalaitoksilla sekä uudella lämmöntalteenottolaitoksella. Lisäksi verkkoon on yhdistetty akkuvaraajia niin perinteisellä vesivarastolla kuin uudempaa teknologiaa käyttävällä hiekka-akulla. Näiden lisäksi on mahdollista tuottaa lämpöä lämpöpumppujärjestelmällä ja datalämmöllä. Myös sähkökattila on suunnitteilla. Näiden tuotantomuotojen optimaaliseen käyttöön pyritään digitaalisen kaksosen mahdollistamalla simulointi- ja ennustusmalleilla.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää digitaalisen kaksosen hyötyjä Vatajankoski Oy:n kaukolämpöverkon kehittämisessä ja jokapäiväisessä käytössä. Lisäksi selvitetään, miten ohjelmistoa voidaan käyttää apuna verkoston optimoinnissa. Gradyentin tekemällä pilvipalvelupohjaisella ohjelmistolla saadaan tehtyä monenlaisia esitystapoja verkon tietojen ja tilanteen nopeaan tarkasteluun ja työssä perehdytään näihin esitysmuotoihin.

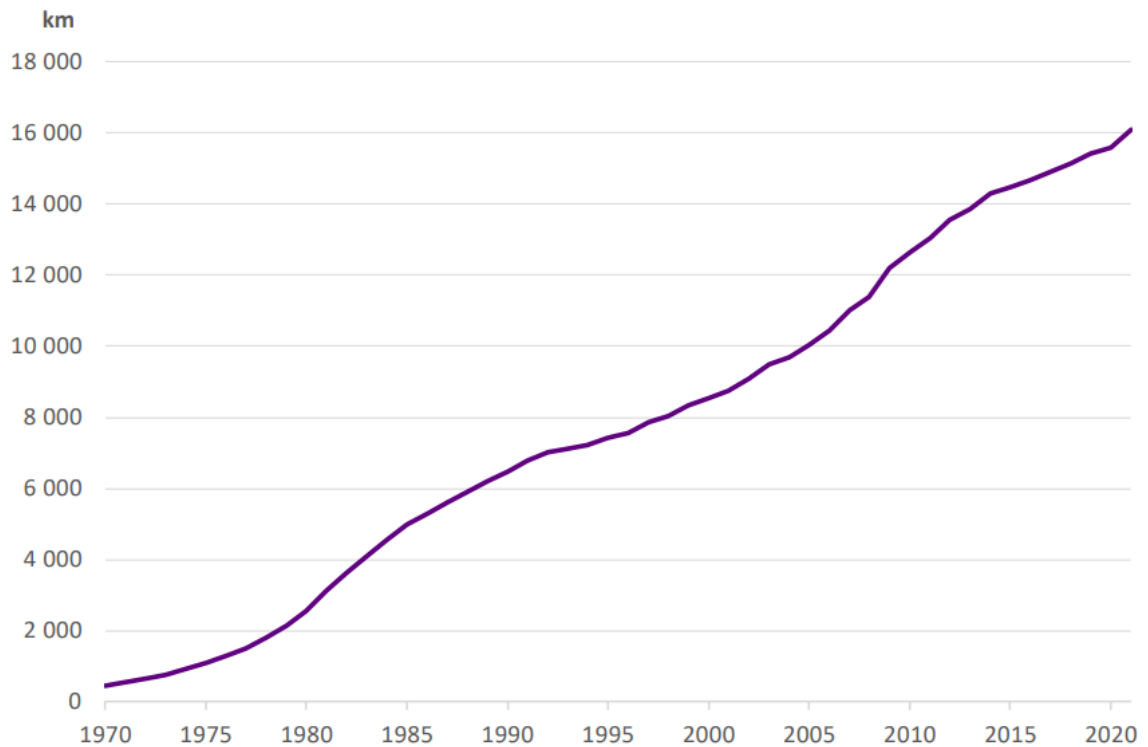
1.3 Menetelmät

Työssä tehdään katsaus kaukolämmön nykytilaan ja tuotantomuotoihin Suomessa. Ensimmäisessä kappaleessa esitellään yleisimmät tuotantomuodot ja järjestelmät sekä niiden käytämät polttoaineet. Siinä perehdytään kaukolämpöverkkoihin ja niiden pääkomponentteihin ja ominaisuuksiin sekä viime aikoina runsaasti lisääntyneisiin energiavarastoihin. Toisessa kappaleessa tutustutaan työn tilaajayritykseen Vatajankoski Oy:hyn ja heidän kattavaan lämmöntuotantomuotojen valikoimaan, joka samalla toimii työssä käsiteltävän digitaalisen kaksosen fyysisenä mallina. Neljännessä kappaleessa tehdään katsaus digitaalisiin kaksosiin yleensä ja mistä ne ovat saaneet alkunsa. Lisäksi käydään läpi niiden päätyypit ja toimintaperiaatteita sekä katsotaan muita vastaavan tyyppisiä malleja, joita käytetään muun muassa rakennusalalla. Viides kappale esittelee Vatajankoski Oy:n digitaalista kaksosta, sen hyötyjä ja käyttökohteita. Tulokset on kerätty empiirisellä tutkimuksella ohjelmiston käyttäjien kokemusten perusteella, sekä omien havaintojen pohjalta.

Työtä varten on selvitetty digitaalisten kaksosten kehitystä erilaisten tietomallien pohjalta. Digitaalista kaksosta voidaan pitää useiden tietomallien yhdistelmänä. Gradyentin digitaalinen kaksonen toimii pilvipalvelun kautta ja erilaiset laskennat sekä optimoinnin lähtökohdat kuuluvat Gradyentin yrityssalaisuuksien piiriin. Näin ollen työ on rajattu tarkastelemaan digitaalisen kaksosen toiminnallisuutta käyttäjän näkökulmasta.

2 Kaukolämpöjärjestelmä

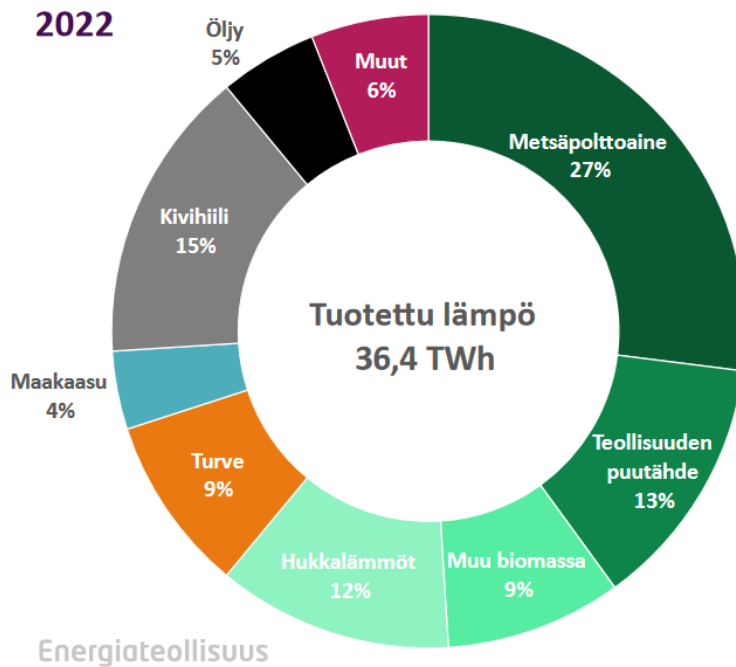
Kaukolämpö lämmittää Suomessa noin kolmea miljoonaa asukasta. Sen markkinaosuus on 46 %, joten tuotannon tehokkuudella ja polttoaineilla on suuri merkitys maan hiilidioksidipäästöihin. Vuonna 2021 kaukolämpöverkkoja oli rakennettuna 16090 km, joka on 1170 km enemmän kuin vuonna 2017 (Energiateollisuus ry 2018, 3). Kaukolämpöverkot laajenevat jatkuvasti, vaikka yleisön huomio on siirtynyt lämpöpumppuihin. Kuvasta 1 nähdään, kuinka kaukolämpöverkon johtopituus on kasvanut vuodesta 1970 ja edellisinä kahtena vuotena käyrä on noussut hieman nopeampaan kasvuun.



Kuva 1. Kaukolämpöverkon johtopituus. (Energiateollisuus ry 2022, 6)

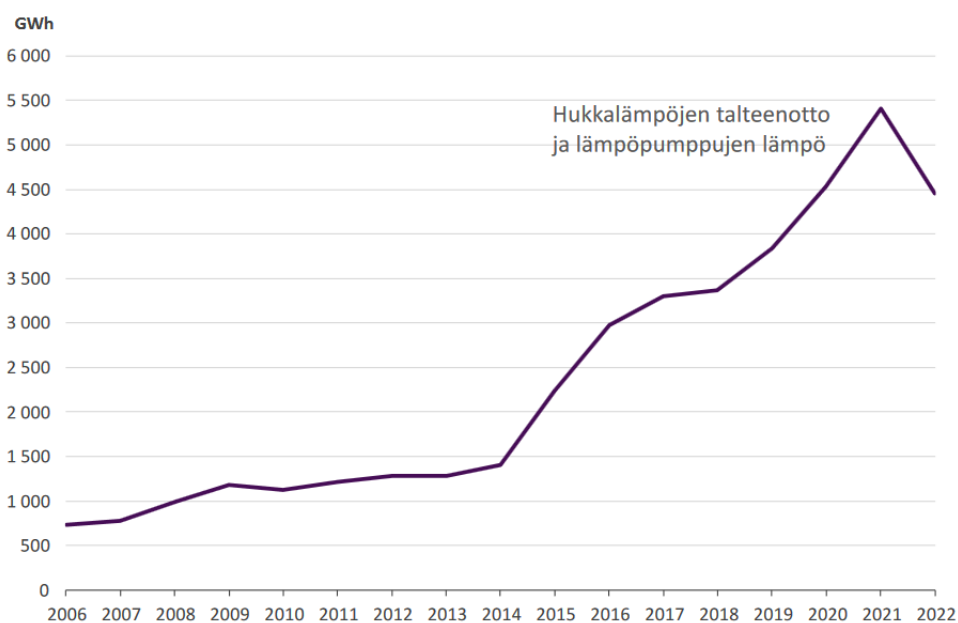
Pääosa kaukolämmön tuotannosta tehdään edelleen perinteisesti polttoaineita polttamalla. Näistä polttoaineista 49 % on uusiutuvia polttoaineita eli metsäpolttoaineita, teollisuuden puutähteitä ja biomassaa. Hukkalämpöjen talteenotto kattoi 12 % kaukolämmön hankinnan energianlähteistä vuonna 2022. Tämä luku kattaa lämmön talteenoton ja lämpöpumppujen

tuotannon. Nämä ja muiden polttoaineiden osuudet nähdään kuvassa 2. (Energiateollisuus ry 2023).



Kuva 2. Kaukolämmöntuotannon polttoainejakauma vuonna 2022. (Energiateollisuus ry 2023)

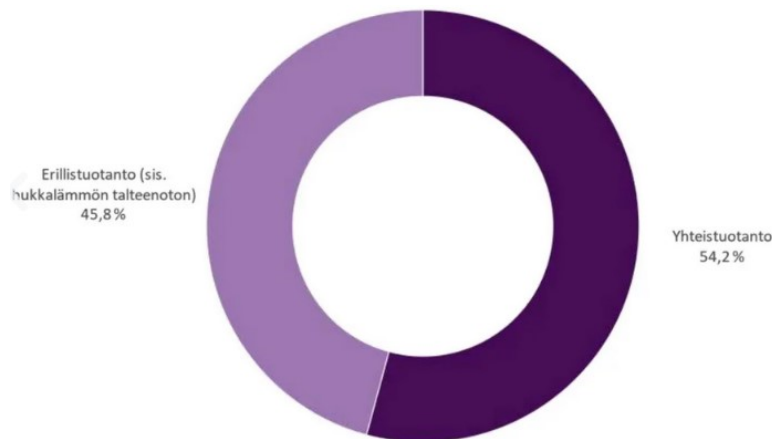
Vuonna 2022 rajusti kohonnut sähkön hinta vähensi etenkin lämpöpumpuilla talteen otettavaa hukkalämpöä. Alla olevasta kuvaajasta nähdään, kuinka tuotanto putosi noin 1000 GWh.



Kuva 3. Hukkalämpöjen talteenotto lämpöpumpuilla. (Energiateollisuus ry 2023, 10)

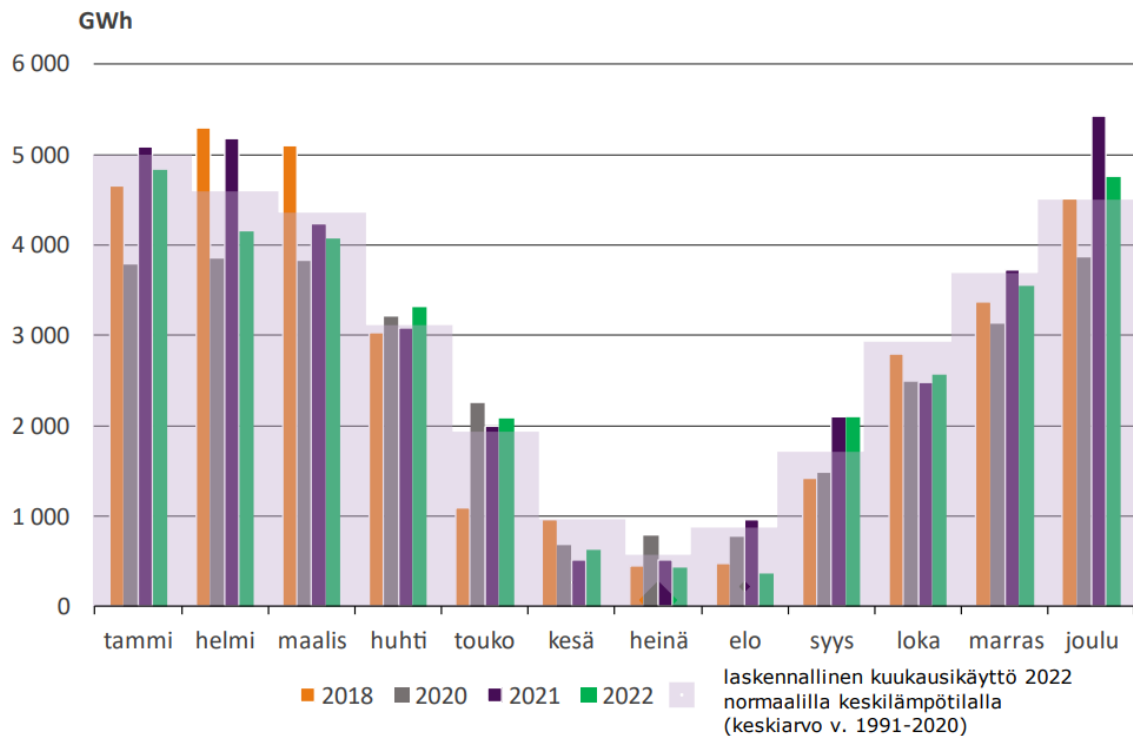
2.1 Kaukolämmön tuotantoluvut

Kaukolämmön tuotanto jakaantuu yhteistuotantoon ja erillistuotantoon. Vuonna 2022 yhteistuotanto kattoi 54,2 % kaukolämmön hankinnasta ja loput 45,8 % oli erillistuotantoa kuten kuvasta 4 havaitaan (Energiateollisuus ry 2023). Yhteistuotanto on Combined Heat and Power eli CHP voimalaitoksissa toteutettavaa sähkön ja lämmön yhteistuotantoa.



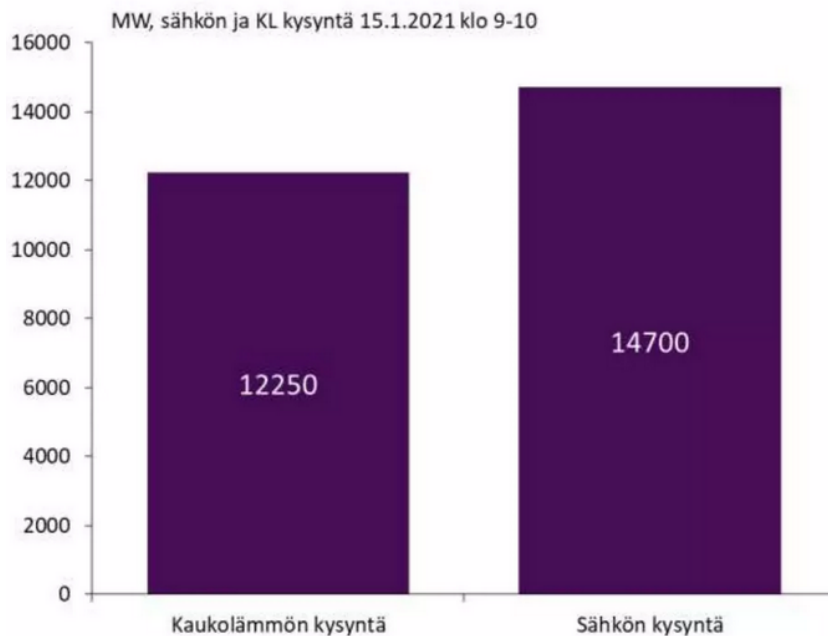
Kuva 4. Kaukolämmön hankinta vuonna 2022 oli yhteensä 33 TWh. (Energiateollisuus ry 2023, 9)

Voimalaitoksen päätarkoituksena on tuottaa kaupungin tai muun alueen kaukolämpöverkkoon lämpöenergiaa. Samalla se voi tehdä mahdollisille höyryasiakkaille sopivan paineista höyryä ja tuottaa sähköä verkkoon. Esimerkkinä voidaan käyttää Vatajankoski Oy:n Kankaanpään kaukolämpövoimalaa, jonka tarkoitus on tehdä kaupungin kaukolämpöverkkoon lämpöä polttamalla puupolttoaineita ja turvetta. Sivutuotteena syntyy 6 MW sähköä laitoksen käydessä täydellä teholla. Kaukolämmön tuotanto vaihtelee eri vuodenaikoina huomattavasti. Seuraavasta kuvasta 5 nähdään, kuinka tuotanto Suomessa keskittyy oletetusti talvi-aikaan. Vertailemalla eri vuosien kuukausikohtauksia kulutuksia paljastuu, kuinka alkuvuosi 2020 oli huomattavasti leudompi kuin 2018.



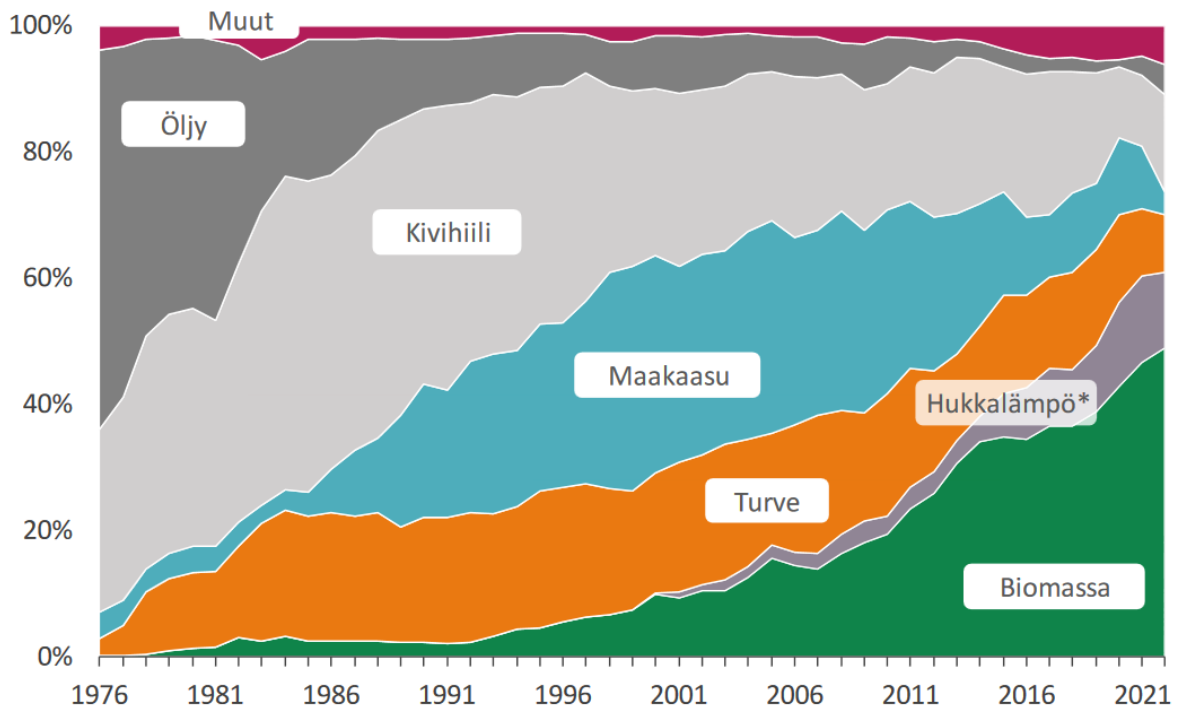
Kuva 5. Kaukolämmön kulutus eri talvikuukausina (Energiateollisuus ry 2023, 4)

Erillistuotantoon kuuluu myös hukkalämmön talteenotto. Erillistuotantolaitos tekee vain lämpöenergiaa, eikä se tuota verkkoon sähköä. Siinä käytetään perinteisesti tulitorvi-tuliputkikattiloita, joissa poltetaan öljyä. Viime vuosina on yleistynyt myös kaasun poltto samoissa kattiloissa sen pienempien päästöjen ja toimintavarmuuden vuoksi. Hake ja pellettikattilat ovat myös yleisiä erillistuotannossa etenkin maaseudulla, jossa polttoainetuotantoa on lähellä. Kaukolämmön vuositaulukoista voidaan katsoa viime vuosikymmenen aikaan rakennettuja kaukolämmön tuotantolaitoksia ja vain harvassa niistä tuotetaan sähköä. Suuriakin yli 30 MW laitoksia on rakennettu kymmenkunta (Energiateollisuus ry 2022b). Taulukosta löytyi eroavaisuuksia laitosten tuotantokapasiteeteista verrattuna yhtiön sivuilla ilmoitettuihin lukuihin, joten aivan tarkkaa lukua suurehkojen kattiloiden ja sähkön tuotannon yhdistelmistä on vaikea sanoa ilman tarkempaa tutkimusta. Kaukolämmön kysyntä on suurimmillaan talvipakkasilla, jolloin myös sähkön kysyntä on korkeimmillaan. Huippukysynnän aikaan lähestytään sähkökapasiteetin rajaa, joten kaukolämmön tuotanto tällöin paljon kuluttavilla sähkökattiloilla ei ole toimiva ratkaisu. Kuvassa 6 on esitetty sähkön ja kaukolämmön kysyntää talven 2021 huippupakkasilla, jolloin CHP-laitosten sähköntuotantokin on korkeimmillaan noin 3000 MW:ssa (Energiateollisuus ry 2022).



Kuva 6. Sähkön ja kaukolämmön kysyntä huippukulutuksen aikaan. (Energiateollisuus ry 2022, 5)

Pitkään jatkunut sähkön edullinen hinta on tehnyt turbiinista kannattamattoman investoinnin. Lisäksi turbiinin hankinta monimutkaistaa voimalaitosta ja sen käyttöä sekä vaatii koulutettua henkilökuntaa, eikä tämä aina ole mahdollista pienissä kaukolämpöyhtiöissä. Hukkalämmön talteenotossa hyödynnetään pääasiassa savukaasujen lämmöntalteenottoa, joka toteutetaan usein savukaasupesurilla. Lisäksi käytetään teollisuusyritysten prosessien hukkalämpöjä sekä geotermistä energiaa. Lämpöpumppujärjestelmiä hyödyntämällä otetaan lämpöä talteen jätevesistä sekä kaukojäähdytyksen paluvedestä. Datakeskukset tuottavat suuria lämpömääriä palvelinkoneiden jäähdytyksestä ja tätä voidaan hyödyntää alueella olevassa kaukolämpöverkossa. (Energiateollisuus ry 2022) Muitakin mahdollisuuksia hukkalämmön keruuseen on lukuisia, mutta kaikki eivät ole kokoluokaltaan, sijainniltaan tai hinnaltaan kilpailukykyisiä. Kuvassa 7 esitetään kaukolämmöntuotannon polttoainejakauman muuttumista 70-luvulta vuoteen 2022. Siitä nähdään kuinka biomassan ja hukkalämmön osuus on kasvanut viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana kattamaan yli puolet tuotetusta lämmöstä.



Kuva 7. Kaukolämmöntuotannon polttoainejakauman muutos vuosina 1976-2022. (Energiateollisuus ry 2023)

2.2 Kaukolämpöverkko

Kaukolämpöverkko koostuu lämmöntuotantolaitoksilta lähtevästä putkivaristosta, joissa lämpö kuljetetaan kuluttajille kuumana vetenä. Vedestä on puhdistettu epäpuhtaudet ja siihen on lisätty hapenpoisto- ja korroosionestokemikaaleja suojaamaan putkistoja. Lisäksi vesi on värjätty, jotta se erottuu vuototapauksissa muista vesistä. Rakennukseen menevä menopotki tuo kesäaikaan noin 65 °C vettä ja kylmimmillä talvipakkasilla jopa 115 °C vettä rakennuksessa sijaitsevaan kaukolämpökeskukseen. Talon lämmitysverkon ja kaukolämpöverkon välissä on lämmönvaihdin, joten molemmat muodostavat omat suljetut piirit eivätkä nesteet sekoitu toisiinsa. Lämmönvaihtimen jälkeen kaukolämpövesi on jäähtynyt 40–60 °C välille ja se tulee paluuputkea pitkin takaisin lämmöntuotantolaitokselle. Uuden K1/2021 rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet -dokumentin mukaan uudisrakennusten lämmönjakokeskukset mitoitetaan siten, että kaukolämmön korkein lämpötila on 90 °C. Vanhoja lämmönjakokeskuksia mitoitetaan uudelleen, kun niiden vaihto tulee ajankohtaiseksi. Tämän myötä verkostolämpötiloja voidaan laskea ja häviöitä vähentää.

Putkisto koostuu runkolinjoista, jotka on kaivettu maan alle noin metrin syvyyteen. Runkolinjat etenevät usein katujen suuntaisesti ja voivat olla jalkakäytävien alla. Putkien halkaisija

voi olla jopa metrin, mutta pääosa on alle puolen metrin kokoluokassa. Runkolinjasta tulee pienempiä haaroja rakennuksiin. Näiden putkien koko on 20 mm:stä ylöspäin. Alle 200 mm putkissa voidaan käyttää rakennetta, jossa molemmat putket ovat saman eristekuoren sisällä. Näin putki vie vähemmän tilaa. Tätä suuremmat putket rakennetaan kahdella vierekkäisellä putkella. Vanhemmat putkilinjat näkyvät talvisaikaan maanpinnan sulaessa niiden yläpuolelta. Niissä käytetyt villaeristetyt betonikanavat tai ohuella polyuretaanieristekerroksella olevat putket hukkaavat lämpöä niin, että maan pinta pysyy leudolla talvikelillä plussan puolella. Uusissa putkilinjoissa käytetään paksumpia eristekerroksia ja tiiviitä kiinnivaahdotettuja polyuretaanieristeisiä putkia. Pinta on vedenpitävä polyeteenimuoviputki, joka suojaa eristettä ja sisällä olevaa teräsputkea kosteuden aiheuttamalta pilaantumiselta ja korroosiolta. Näillä putkilla häviöt ovat pienempiä, eikä maa välttämättä pysy enää sulana remontoitujen linjan yläpuolella. Näin kävi myös Kankaanpäässä Jämintien runkolinjan uusimisen jälkeen. Energiayhtiön kannalta hukkalämmön väheneminen on kuitenkin hyvä asia. Kaukolämpöverkkojen häviöt ovat pienissä taajamissa 10–15 % luokkaa, joten hukka on merkittävä. Tiheämmissä kaupungeissa missä linjat ovat lyhyempiä ja suurempia ovat häviöt 5–8 % luokkaa. (Energiateollisuus ry 2020)

2.2.1 Kaukolämmön pumppaus

Kaukolämpöverkossa olevaa kuumaa vettä kierrätetään keskipakopumpuilla, joita pyöritetään teholtaan 30–1000 kW oikosulkumoottoreilla. Pumppuja kytketään rinnan, kun halutaan suurta tilavuusvirtaa ja sille isoa säätövaraa. Sarjaan kytkettyjä pumppuja käytetään, kun vaaditaan suurta nostokorkeutta tai tarvitaan välipumppaamoja pitkissä putkistolinjoissa. Vuorokauden sisällä tapahtuva virtauksen vaihtelu voi olla suurta riippuen minkälaisia kuluttajia putkilinjan varrella on. Näihin on pystyttävä vastaamaan niin kesäkaudella pienen kulutuksen aikaan kuin talvikaudellakin maksimikulutuksen hetkellä. Pumppujen mitoituksessa on huomioitava riittävän virtauksen lisäksi sopivat painetasot. Pumppujen on katettava kaukolämpöverkon häviöt ja taattava asiakkaille vähintään 0,6 barin paine-ero. Paineeron ei kuitenkaan tule ylittää 5 baria tai syntyä meluongelmia korkean paineen aiheuttamasta kohinasta säätöventtiilissä. Jos lämpöverkossa on suuria korkeusvaihteluita, on huomioitava alipaineen aiheuttama kavitoinnin vaara. Pumpun imukyky ilmoitetaan termillä NPSH (Net Positive Suction Head) joka kertoo, kuinka suuri paine tulee olla pumpun

imukanavassa. Jos paine alittaa tämän ilmoitetun luvun, muodostuu imupuolelle alipainetta ja kaukolämpövesi höyrystyy. Muodostuu kuplia, jotka rikkoutuessaan pumpun impellerissä aiheuttavat hiekkamaista rahinaa ja nopeaa eroosiota. Kavitaatiota voidaan vähentää painepuolelle asennettavilla kuristusventtiileillä, virtauksen kuristaminen kuitenkin johtaa pumpausenergian tuhlaamiseen. Parempi keino on tehdä välipumppaamo mäen juurelle. Laaja tilavuusvirtausalue ja varautuminen tulevaisuudessa laajenevaan verkkoon tuo haasteita pumppujen koon mitoittamiseen eikä aina päästä parhaalle säätöalueelle. Pienimpiä virtaustilanteita varten voidaan käyttää erillisiä pieniä kesäpumppuja. Pumppausteho voidaan laskea alla olevan kaavan 1 mukaan käyttämällä apuna tilavuusvirtaa, paine-eroa ja pumpun hyötysuhdetta. (Koskelainen et al 2006, 170–173) (Energiateollisuus ry 2011, 1–2)

$$P = \frac{\dot{V}\Delta p}{\eta} = \frac{\dot{V}\rho gH}{\eta} = \frac{\dot{m}gH}{\eta} \quad (1)$$

missä

P	pumpun akselin teho	[W]
\dot{V}	tilavuusvirta	[m ³ /s]
Δp	paine-ero	[Pa]
η	hyötysuhde	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
g	putoamiskiihtyvyys	[9,81 m/s ²]
H	nostokorkeus	[m]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]

2.2.2 Lämpöhäviöt

Kaukolämpöputkista syntyy häviöitä lämpöenergian johtuessa eristeiden läpi ympäröivään kylmään maahan. Mitä suurempi lämpötilaero on, sitä enemmän häviöitä syntyy. Häviöitä voidaan ilmoittaa prosentteina putkessa kulkevasta lämpöenergiasta. Pienillä putkilla, joiden koko on noin DN 50 ovat häviöt luokkaa 10–20 % ja suuremmilla keskimäärin DN 150

putkilla häviöt ovat 4–10 % luokkaa. Suurissa putkissa kulkee enemmän energiaa suhteessa niiden vaipan pinta-alaan, josta häviöt syntyvät, siksi niiden häviöprosentit ovat pienempiä. Osa hukkalämmöstä siirtyy paluuputkeen ja se voidaan hyödyntää lämpölaitoksella.

Lämpöhäviöiden syntyyn vaikuttavia tekijöitä ovat:

- verkoston liian korkea lämpötila
- kaukolämpöputkiston liian ohut lämmöneristys
- vanhojen eristeiden suuri lämmönjohtavuus
- kaukolämpökaivojen puutteellinen lämmöneristys
- ulkopuolisten vuotovesien jäädyttävä vaikutus
- hyvin lämpöä johtava maaperä
- matalalle haudattu putkisto
- huonosti tehdyt eristykset putkissa
- verkoston vajaakäyttö (ylimitoitettu putkisto)
- lämmön mittauksen epätarkkuudet tulkitaan häviöiksi, kun niistä ei pystytä laskuttamaan

Putkiston lämpöhäviövirta voidaan laskea lämmönsiirtokertoimen avulla, johon vaikuttaa putkien eristys, sekä putkien lämpötilojen avulla. Näin saadaan putkien häviölämpövirta, joka on noin 15–30 W/m putkikoilla DN 20–DN 65. Koska putkien eristykseen ei voida juuri vaikuttaa kaivamatta putkilinjoja auki ja uusimatta niitä, jää vaihtoehdoksi laskea lämpötiloja, jolloin häviöt alenevat. (Koskelainen et al 2006, 203, 209, 216)

2.2.3 Painehäviöt

Kaukolämpöputkistossa muodostuu painehäviöitä pitkissä putkilinjoissa, suurilla virtausnopeuksilla sekä pienillä putkihalkaisijoilla, koska nämä muodostavat virtaukselle kitkaa. Lisäksi on erilaisissa haaroissa, käyrissä ja venttiileissä muodostuvia kertavastuksia. Myös putkien kunto eli sisäpuolen karheus vaikuttaa häviöihin. Erityisen suuri vaikutus on pienillä

putkihalkaisijoilla ja suurilla virtausmäärillä. (Koskelainen et al 2006, 199, 202) Painehäviöt tulee huomioida laskennassa talvi- ja kesäolosuhteissa. Kun kesäaikainen verkon lämpötila on alhaisempi saattaa käyttöveden kulutus ylittää teholtaan lämmityksen tehontarpeen. Jos verkon eri puolilla sijaitsee tuotantolaitoksia, tulee huomioida näiden mahdollisen eriaikaisen käytön aiheuttamat virtauksen muutokset. Siirtojohdoissa jäähtymä on heikompi ja lämpötilaero vain noin 30–40 °C, käytetään mitoituskseen painehäviötä 0,5–1 bar/km. Vastavasti runko- ja jakeluverkossa lämpötilaero on noin 45–55 °C, jolloin käytetään painehäviötä 1 bar/km tai jos paine-eroa on runsaasti käytettävissä jopa 2 bar/km. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 54)

2.3 Kaukolämpövoimalat

Yhteistuotantotavoista höyrykattilalaitos vastapaineturbiinilla on tavanomaisin tapa kaupunkien lämmöntuotantoon. Näiden CHP-laitosten monipuolisuus polttoaineiden ja energiatuotteiden muodossa on ylivoimainen. Näiden lisäksi on myös kaasumoottoreihin perustuvia kombivoimalaitoksia, joilla päästään korkeisiin sähköntuotantolukuihin ja lisäksi saadaan kaukolämpöä. Moottorivoimalaitoksia, joilla saadaan helposti laajennettavia ja hyvin säätyviä laitoksia. Suomessa on pääasiassa rakennettu CHP-laitoksia niiden edullisempien polttoaineiden vuoksi.

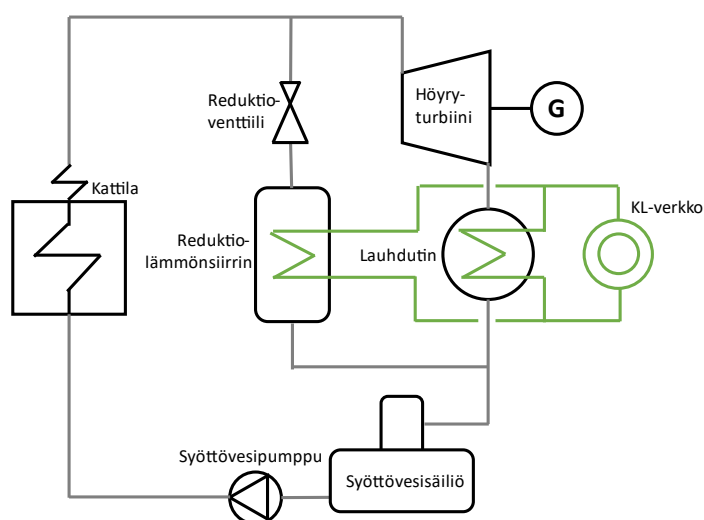
2.3.1 Yhteistuotanto

Kaukolämmön tuotanto verkkoon tapahtuu CHP-laitoksissa, joissa käytetään yleisesti leijupeti- tai kiertopetikattiloita. Näissä kattilan pohjalla on noin puolen metrin kerros hiekkaa, jonka sekaan polttoaine syötetään. Hiekan alta puhalletaan leijutusilmaa, joka saa hiekkapedin fluodisoitumaan. Polttoaineen hienoimmat partikkelit palavat heti pesään tullessa ja suuremmat palaset hioutuvat pieneksi ja palavat hiekkapedissä. Hiekka varaa lämpöä, joten polttoaineen kosteudenvaihtelut eivät juuri heikennä palamista. Kattilan yläosassa on tulistimet ja savukaasut jatkavat lämmöntalteenottopinnoille kuten ilman- ja veden esilämmittimille.

Kiertopetikattilassa ilmavirtaus on paljon suurempi, jolloin hiekka poistuu kattilasta ilma-
virran mukana. Hiekka kerätään talteen sykloneilla, jotka erottavat hiekan savukaasuista.

Savukaasut jatkavat tulistimille ja lämmöntalteenottopinnoille. Hiekka putoaa hiekkaluk-koon, joka toimii viimeisenä tulistimena ja tämän jälkeen hiekka valuu takaisin kattilaan ja kierto alkaa uudelleen. Kiertopetikattilat ovat yleensä suurempia kooltaan ja tehoiltaan, kuin leijupetikattilat ja niissä on erittäin hyvä ilman ja polttoaineen sekoittuminen sekä tasainen lämpöprofiili. Niissä voidaan polttaa myös kierrätyspolttoaineita puhtaasti.

Kattiloissa vesi höyrystetään ja höyry tulistetaan yli 500 °C, jonka jälkeen se johdetaan höyryturbiinille. Turbiinissa höyry ajetaan suuttimina toimivien johtosiivekkeiden läpi, jolloin höyryn nopeus kasvaa ja paine laskee. Höyrystuuhku osuu pyörivään juoksusiipeen turbiinin roottorissa ja luovuttaa liike-energiaa. Tämä toistuu useiden turbiinijaksojen ajan, jolloin paineen laskiessa höyry paisuu ja lämpötila laskee. Sopivassa paine- ja lämpötilatasossa voidaan osa höyrystä ottaa ulos turbiinin väliotosta ja käyttää esilämmityksiin, myydä höyryasiakkaille tai sillä lämmitetään kaukolämpöä. Pääosa höyrystä kulkee koko turbiinin läpi, jonka jälkeen se lauhdutetaan vedeksi kaukolämmönvaihtimessa. Samassa laitoksessa voidaan tuottaa kaukolämpöä, useita eripaineisia höyryjä sekä sähköä hyvällä yli 90 % kokonaisuhyötysuhteella. Näistä laitoksista käytetään nimitystä vastapainelaitos. Sillä tarkoitetaan lauhduttimessa olevaa ilmanpainetta korkeampaa painetta, jolla saadaan turbiinista tulevan höyryn lauhtuminen tapahtumaan korkeammassa paineessa ja yli sadan asteen lämpötilassa. Kuvassa 8 on esitetty yksinkertainen kuvaus CHP-voimalan kaaviosta. Normaalitilanteessa kattilan tuottama tuorehöyry tekee höyryturbiinilla sähköä ja lauhdutin lämmittää kaukolämpöä. Mahdollisen turbiinivian tai huollon aikana lämpöä voidaan tuottaa reduktiolämmönsiirtimellä.



Kuva 8. CHP-voimalan yksinkertaistettu kaavio. (Petri Lähde)

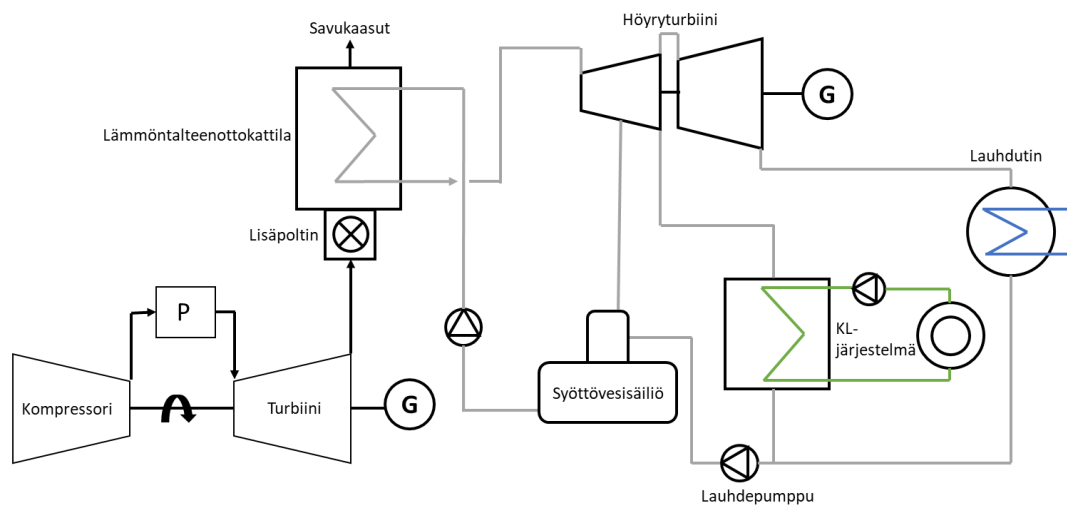
Toinen laitostyyppi, jota ei kuitenkaan käytetä kaukolämmön tuotantoon, on lauhdelaitos. Siinä jäähdytykseen käytetään suurten vesistöjen vettä tai lauhdutintorneja. Näiden lauhduttimessa on alipaine noin 0,04 bar ja loppulämpötila alle 40 °C. Näin alhaisia lämpötiloja on hankala hyödyntää, joten lämpö menee hukkaan ja kokonaishyötysuhde jää hieman yli 40 %:iin. Yleisimpiä lauhdelaitostyyppisiä Suomessa ovat ydinvoimalat ja Meri-Porissa sijaitseva Fortumin Tahkoluodon hiilivoimala. (Huhtinen et al 2008, 36)

2.3.2 Kombivoimala

Muita tapoja toteuttaa kaukolämmön yhteistuotantoa ovat kombivoimalat, joissa kaasuturbiinimoottori on yhdistetty lämmöntalteenottoon ja höyryturbiiniprosessiin. Esimerkkeinä näistä ovat Helsingin Vuosaarella oleva Vuosaari B kombivoimalaitos ja Tampereella sijaitseva Lielahden voimalaitos. Molemmat laitokset käyttävät polttoaineenaan maakaasua ja niissä on kaksi kaasuturbiiniyksikköä. Kaasuturbiini on lentokoneiden suihkumoottoreihin perustuva turbiini, jolla pyöritetään sähkögeneraattoria. Pienimmät mallit ovat samoja moottoreita mitä lentokoneissakin käytetään pienillä muutoksilla ja suuret mallit ovat alusta asti voimalaitoskäyttöön suunniteltuja, mutta toimintaperiaate on sama. Turbiinimoottori koostuu kompressoriosasta, joka imee ilmaa koneeseen ja paineistaa sen. Ilma syötetään polttokammioon, jossa se toimii polttoaineen palamisilmana. Kuumat palokaasut johdetaan moottorin perässä sijaitsevan turbiinisiivistin läpi, jolloin ne pyörittävät akselia, jolla myös kompressorin akseli on. Kompressorin akseli saa käyttövoimansa palokaasuista ja akselista voidaan ottaa voimaa ulos sähköntuotantoa varten. Suurissa voimalaitoskaasuturbiineissa on perässä vielä toinen erillisellä akselilla oleva voimaturbiini. Se voidaan suunnitella pyörimään pienemmällä nopeudella yhteensopivaksi generaattorin kanssa. Palokaasut ovat kuumia, vähintään noin 450 °C ja niissä on korkea happipitoisuus. Kombilaitoksessa palokaasut otetaan talteen lämmöntalteenottokattilassa. Kattila koostuu samoista osakokonaisuuksista kuin tavallistenkin kattiloiden lämmöntalteenotto-osat ja sillä voidaan tuottaa kaukolämpöä ja höyryä. Höyry johdetaan höyryturbiinille ja sähköntuotantoa saadaan lisättyä. Kattilaan voidaan asentaa lisäpolttimia, jotka käyttävät palamisilmana kaasuturbiinin korkeahappista palokaasua. Niillä höyryn loppulämpötilaa saadaan korkeammaksi ja höyryturbiinin hyötysuhdetta suuremmaksi. Lisäksi voidaan käyttää useampaa eri painetasoa, jolloin kattilan alkupäästä saadaan turbiinille korkeampipaineista ja kuumempaa höyryä. Matalammalla painetasolla

oleva piiri pystyy hyödyntämään paremmin kattilan loppupään savukaasujen lämmön. Näin hyötysuhteesta saadaan korkeampi. Lauhduttimesta saadaan lämpöä kaukolämpöverkkoon ja höyryturbiinin väliotoista voidaan myydä teollisuuteen höyryä. (Huovilainen 2018, 3)

Kuvassa 9 on esitetty kaavio kombivoimalaitoksesta, jolla voidaan tuottaa kaukolämpöä. Kesäaikaan lämmöntarpeen ollessa pieni, voidaan osa höyrystä ajaa koko turbiinin läpi ja lauhduttimella ajaa lämpö esimerkiksi mereen. Tällä ajotavalla saadaan tuotettua enemmän sähköä. Kombivoimaloissa ja monissa CHP-voimaloissakin on yleensä useita vaihtoehtoisia ajotapoja, joilla voidaan optimoida lämmön tai sähkön tuotantoa energian tarpeen ja hinnan vaihteluiden mukaan.



Kuva 9. Kombivoimalaitoksen kaavio. (Petri Lähde)

2.3.3 Moottorivoimala

Moottorivoimalat perustuvat dieselkäyttöisiin mäntämoottoreihin, samoja moottoreita on muutettu myös maakaasu- ja biokaasukäyttöisiksi. Wärtsilän verkkosivuilla suurin malli on 46F, jonka teho on enimmillään 19,2 MW. Suuria voimalaitoksia voidaan toteuttaa käyttämällä useampia moottoreita. Esimerkkinä tästä on Wärtsilän Bangladeshiin toimittama 310 MW voimalaitos, jossa on 17 moottoria. (Wärtsilä.com 2016) Niiden polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä. Vaihtoehtoisia polttoaineita kuten metanolia voidaan käyttää moottoreissa ja vetykäyttöisiä moottoreita on myös testikäytössä. Perinteisesti suuria moottoreita on käytetty sähkön tuotantoon laivoissa ja lämpimissä maissa eikä lämmöntalteenotolle ole ollut suurta tarvetta, vaan on pyritty maksimoimaan sähkön tuotanto. Lämmön talteenotto

tapahuu moottorin jäähdytysvedestä ja savukaasuista. Savukaasujen lämpötila on kaasuturbiinimoottoreita alhaisempi, noin 360 °C, joten höyryturbiiniprosessin hyötysuhde on alhaisempi eikä useampia painetasoja käytetä. (Wärtsilä.com 2023)

Vatajankoski Oy:llä on Honkajoella biokaasua käyttävä Jenbacher-merkkinen kaasumoottori, jonka pakokaasuista otetaan lämpöä talteen. Lämpö syötetään läheisille kasvihuoneille niiden lämmitykseen. Lisäksi järjestelmään kuuluu Bosch-höyrykattila. Nämä järjestelmät eivät ole osa Kankaanpään kaukolämpöjärjestelmää.



Kuva 10. Vatajankoski Oy:n Jenbacher kaasumoottori (Petri Lähde)

Moottorivoimalaitokset toimivat Suomessa pääasiassa varavoimalaitoksina teollisuuden, voimalaitosten ja muiden kriittisten kohteiden yhteydessä. Niillä tuotetaan lähinnä pelkkää sähköä, eikä lämmöntalteenottoa ole kuin harvoissa tapauksissa. Näitä ovat muun muassa kohteet, joissa moottori käyttää esimerkiksi biokaasua. Suuremmat kaasumoottorit ovat Finngridin käytössä olevia varavoimalaitoksia, joilla toteutetaan verkon säätökapasiteettia ja taajuudenpalautusta. Laitosten käyttöaika on keskimäärin 10 tuntia vuodessa ja niitä käytetään tehopulatilanteissa (Fingrid.fi 2021).

2.4 Lämpökeskukset

Kaukolämpöverkkojen ja suurempien kiinteistöjen lämmityksessä käytetään lämpökeskuksia, joilla tuotetaan pelkkää lämpöä. Pääasiassa tuotetaan kuumaa vettä, mutta myös höyryn tuotanto on mahdollista etenkin teollisuuskiinteistöjen yhteydessä. Laitokset toimivat korkealla jopa yli 90 % hyötysuhteella riippuen niiden käyttötarkoituksesta ja ajotavasta. Pääasiallisena polttoaineena on kevyt polttoöljy, johon on siirrytty päästörajoitusten ohjaamana raskaan polttoaineen suurien päästöjen vuoksi. Lisäksi käytetään kaasua, puuta ja myös turvetta.

Yleisesti alle 20 MW kattilat toteutetaan tulitorvi-tuliputkikattiloina, jotka ovat kyljellään olevan lieriön muotoisia ja poltinskyköt on kattilan päässä. Näissä polttimeen liekki palaa tulitorvessa, josta savukaasut kulkevat useiden kymmenien tuliputkien kautta edes takaisin kattilassa ja kohti savupiippua. Tulitorvi ja tuliputket on ympäröity kattilassa olevalla vedellä. Suuren vesitilavuuden takia kattila toimii myös varaajana ja tasoittaa näin suurempien kulutuksen vaihteluita. (Koskelainen et al 2006, 282). Kuvassa 11 on Vatajankoski Oy:n 5MW:n kaasukattila, jota käytetään pääkattilan tukena sen ollessa poissa käytöstä tai kovimilla pakkasilla. Polttoaineena on nestekaasu eli LPG (Liquefied Petroleum Gas).



Kuva 11. Vatajankoski Oy:n 5MW kaasukattila (Petri Lähde)

Suurempitehoiset kattilat toteutetaan voimalaitoskattiloiden tapaan vesiputkikattiloina. Näillä päästään korkeampiin paineisiin, suurempiin tehoihin ja niillä saadaan tehtyä myös tulistettua höyryä. Niiden rakenne on tulitorvi-tuliputkikattiloita kevyempi. Vesitilavuus on pienempi, joten kattila ei toimi juurikaan varaajan ominaisuudessa. Kun käytetään kiinteitä polttoaineita, valitaan kattilatyypiksi yleensä vesiputkikattila. Aivan pienimmissä arinakattiloissa on kiinteän polttoaineen käytössä myös tuliputkikattiloita. (Koskelainen et al 2006, 283)

2.5 Sähkökattilat

Sähkökattilat ovat vanhaa tekniikkaa, jota on ollut teollisuuden käytössä jo 1900-luvun alkupuolelta. Viime vuosikymmeninä niitä on lähinnä käytetty pientalojen kuuman käyttöveden tekoon. Suurien, yli megawatin kattiloiden käyttöä on rajoittanut korkea sähkön hinta. 2020-luvun alussa on uutisoitu useista sähkökattilainvestoinneista eri medioissa ja energia-yhtiöiden investointisuunnitelmissa näkyy sähkökattiloita korvaamassa polttamalla tuotettua kaukolämpöä. Ainakin Tampereelle, Seinäjoelle, Helsinkiin, Tervakoskelle, Kankaanpäähän ja Poriin on suunnitteilla sähkökattiloita kaukolämmön tuotantoon. Edullisten uusiutuvien sähköntuotantomuotojen kuten tuuli- ja aurinkoenergian yleistyessä on ajoittain saatavissa erittäin halpaa sähköä. Kun sähkökattilan yhteyteen rakennetaan varastointikapasiteettia kuten lämpöakkuja, voidaan halpojen aikojen tuotantoa varastoida päivän kulutushuipuihin ja varaston koosta riippuen myös tulevien päivien kalliimmille tunneille.

Sähkökattiloita on höyryntuotantoon sopivia elektrodikattiloita ja perinteisempiä lämmön tuotantoon tarkoitettuja vastuskattiloita. Elektrodikattilat voivat olla suuria kymmenien megawattien tehoisia, joissa johtavaksi käsitelty vesi pumpataan kattilan yläosassa olevaa altaaseen, jossa elektrodit johtavat sähköä veden läpi ja lämmittävät sitä. Kattilan alaosa toimii vesivarastona. Suuret kattilat vaativa kilovolttien jännitteitä toimiakseen ja erityistä veden käsittelyä, jotta pH saadaan riittävän happamaksi ja johtokyky saadaan sopivan korkeaksi. Veden erityisvaatimusten vuoksi lämmönsiirto kaukolämpöön tulee tehdä lämmönsiirtimen avulla.

Vastuskattilassa käytetään tehosta riippuen kymmeniä metallisia vastuksia, joilla energia siirretään veteen. Tehoa voidaan säätää veden virtausta muuttamalla, vastusten tehoa muuttamalla tai sammuttelemalla osaa vastuksista. Jännite on matala 400/690V verrattuna

elektrodikattiloihin, jolloin ohjaus ja sähkönsyöttöratkaisut ovat yksinkertaisempia ja edullisempia. Tehot jäävät muutamaa megawattiin. Etuna voidaan pitää lisäksi sitä, että erillistä lämmönsiirintä ei tarvita vaan kaukolämpövesi voidaan ajaa suoraan kattilan läpi.

(Jalovaara et al 2003, 22–24)

2.6 Lämmön varastointi

Kaukolämmön varastoinnilla pyritään vastaamaan verkoston kulutuspiikkeihin ja mahdollistamaan lämmöntuotannon tasaisempi ajo myös pienimmän kulutuksen aikana. Yleisesti kaupunkien kaukolämpöverkoissa on yöaikaan pieni kulutus, jolloin tuotantoa voi olla liikaa ja aamulla sekä illalla tulee kulutuspiikki lämpimän käyttöveden kulutuksen lisääntyessä. Varastokapasiteetin koon mukaan pystytään vastaamaan päivän sisäisiin kulutuspiikkeihin tai myös viikon sisällä tapahtuviin muutoksiin. Muutokset voivat johtua sään muutoksista, joista suurin tekijä on ulkolämpötila. Myös tuotannossa saattaa olla muutoksia, esimerkiksi jos verkossa on lämmöntalteenottolaitos, joka perustuu teollisuuden prosesseihin. Tällainen lämmöntalteenottolaitos saattaa olla viikonloput pois käytöstä, joten tuotantoa voidaan varastoida lämpöakkuihin viikon aikana. Varastointiratkaisuilla voidaan saada kaukolämpölaitosten ajo tasaisemmaksi ja pienemmän laitoksen teho riittämään ajoittaiseen suureen tehontarpeeseen. Näin voidaan tasata sähköntuotantoa ja vähentää muutoksia sähköverkossa, kun laitoksen tehoa ei tarvitse säätää alas aina lämmöntarpeen laskiessa. (Koskelainen et al 2006, 383)

Lämpövarastot voidaan jakaa kolmeen pääryhmään niiden energianvarastointitavan mukaan. Niitä ovat tuntuva, latentti ja termokemiallinen lämpövarasto. Yleisimmin käytetään tuntuvaan lämpöön perustuvia varastointimenetelmiä kuten yksinkertaista vesivaraajaa. Toinen varausmuoto perustuu latenttiin lämpöön eli faasimuutosmateriaaleihin. Näissä on yleensä aineen olomuodon muunnos kiinteään ja nestemäisen muodon välillä. Myös neste – kaasumuunnos tai kiinteään aineen hilarakenteen muutos on mahdollinen, mutta harvoin käytetty suurien paineenmuutoksien sekä pienehkön varastointikapasiteetin vuoksi. Faasimuutoksessa varautuu tai vapautuu suuri määrä energiaa, mutta lämpötilan muutos varastossa voidaan pitää pienenä, jolloin materiaalit rasittuvat vähän. Samaan varastointitilavuuteen saadaan talteen enemmän energiaa kuin tuntuviin lämpövarastoihin. (Ding 2021, 55)

Termokemialliset lämmönvarastointitavat perustuvat kahden aineen yhdistelmiin, jotka yhdistyessään reagoivat eksotermisesti ja luovuttavat lämpöä. Varastoitaessa lämpöenergiaa tapahtuu endoterminen reaktio, kun aineita kuumennetaan. Aineet erottuvat toisistaan, jolloin ne voidaan varastoida erillisissä astioissa. Järjestelmän hyvänä puolena on mahdollisuus varastoida energiaa erittäin pitkiä aikoja. Varastointitavalla saavutetaan myös korkeita jopa 1000 °C lämpötiloja. Rajoittavina tekijöinä toimii materiaalien kestävyys, koska osa aineista on voimakkaasti korrosoivia. (Ding 2021, 107–117)

Kaukolämpöjärjestelmien lämpöakuissa käytetään yleisesti kuumaa vettä. Pienempiä teräs-säiliöitä voidaan valmistaa paineellisiksi ja niihin saadaan varastoitua 115 °C kaukolämpövettä. Myös suuria kallioon louhittuja entisiä öljyvarastoja voidaan käyttää paineellisena. Suuremmat maanpinnalliset säiliöt rakennetaan paineettomina pienempien kustannusten vuoksi joko teräksestä tai betonista, näissä voidaan varata lähes 100 °C vettä. Säiliöt eristetään lämpöhäviöiden pienentämiseksi noin 200 mm villakerroksella. Kuvassa 12 on esimerkkinä Kankaanpäässä olevat Vatajankoski Oy:n kaukolämpöakut. Järjestelmästä kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.4

Kallioluolia ei eristetä ja niissä on ensimmäisten 4–5 vuoden aikana suuremmat lämpöhäviöt, kunnes kallioperän lämpötila tasaantuu. Terässäiliöiden yläosassa pidetään pientä höyrynpainetta, jolla estetään ilman tulo säiliöön. Lisäksi sillä saadaan kompensoitua säiliöön muodostuvaa alipainetta, kun lämpöä käytetään ja veden tilavuus pienenee. Lämpövarastoja voidaan käyttää suoralla tai epäsuoralla kytkennällä. Suorassa kytkennässä kaukolämpöputkissa kiertävä vesi kiertää myös varastossa. Tällöin on huomioitava veden ja säiliön puhtaus. Muista kuin terässäiliöistä voi irrota epäpuhtauksia kaukolämpövedeen. Epäsuorassa kytkennässä lämpö siirretään lämmönvaihtimilla säiliön vedestä kaukolämpövedeen. Tässäkin tapauksessa on huomioitava lämpövaraston veden puhtaus, etteivät lämmönsiirtimet tukkeudu. Kytkennässä voidaan hyödyntää myös lämpöpumppuja, jolloin lämpöakun kapasiteetti pystytään hyödyntämään kokonaisuudessaan. (Koskelainen et al 2006, 386–392)



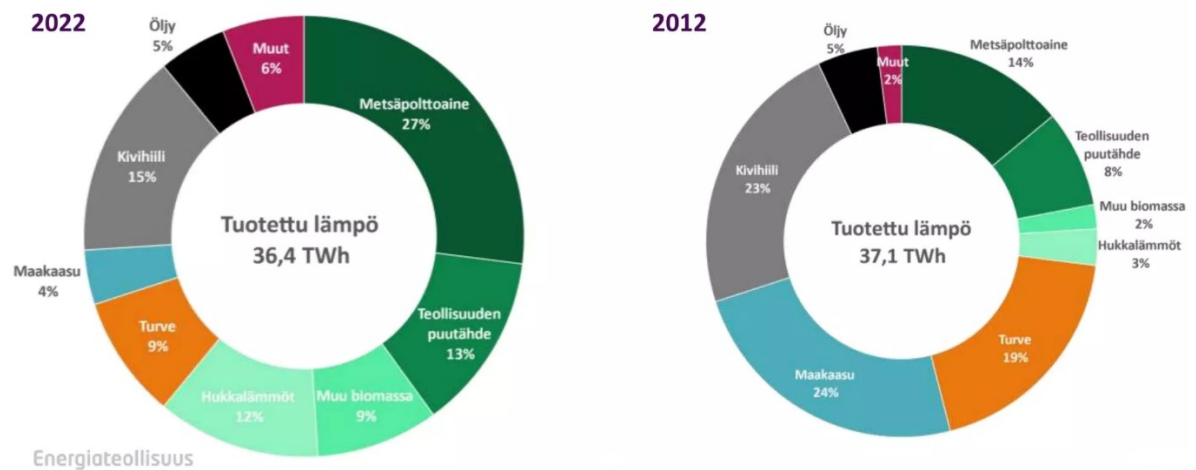
Kuva 12. Vatajankoski Oy:n kaukolämpöakut rakennusvaiheessa. (Petri Lähde)

2.7 Kaukolämmöntuotannon polttoaineet

Suurissa CHP-laitoksissa voidaan polttaa useita eri polttoaineita samassa kattilassa. Lisäksi suuriin laitoskokonaisuuksiin liittyy muitakin vara- ja apukattiloita eri polttoaineilla. Esimerkiksi Porin Kaanaan teollisuusalueella sijaitseva Porin Prosessivoima Oy:n biovoimalaitoksessa voidaan polttaa puupolttoaineita kuten haketta ja purua, turvetta, hiiltä ja esikäsittelyä kierrätyspolttoainetta eli REF polttoainetta (REcovered Fuel). Näiden lisäksi kattilassa käytetään kevyttä polttoöljyä käynnistys- ja tukipolttoaineena. Kesäkäytössä ja varakattilana toimii nesteytettyä maakaasua eli LNG:tä käyttävä kattila, johon tulee kaasuputki Porin satamassa olevasta LNG terminaalista. (Porienergia.fi 2022)

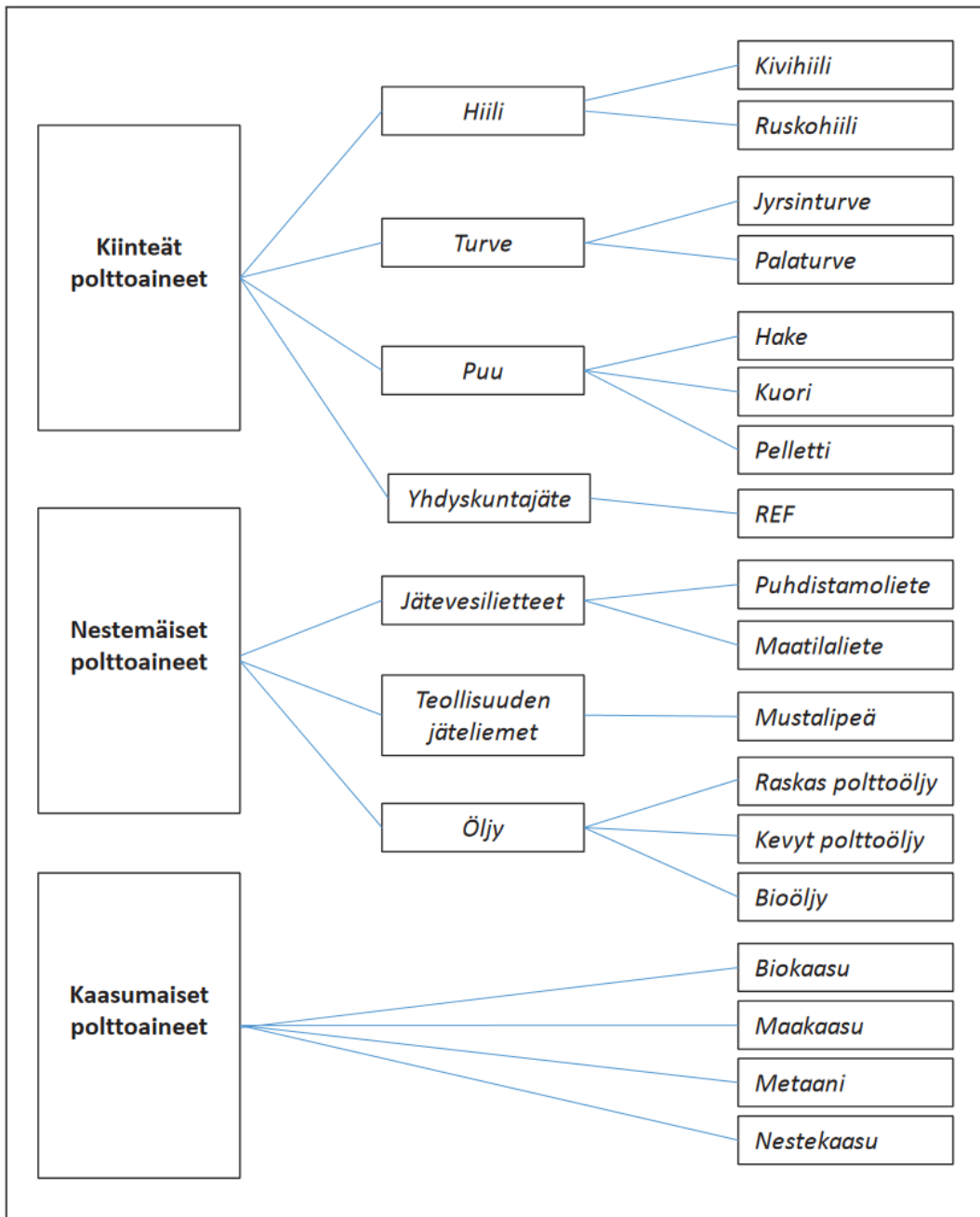
Turpeen käytön vähentäminen nopeutui pääministeri Sanna Marinin hallituksen hallitusohjelmassa olevan tavoitteen myötä. Siinä tavoitellaan energiaturpeen käytön puolittamista vuoteen 2030 mennessä. Myös päästöoikeuksien hinnan moninkertaistuminen 2020 vuodesta on tehnyt turpeesta kalliin polttoaineen ja näin nopeuttanut sen poisjääntiä. Valtioneuvosto antoi alkuvuodesta 2022 asetuksen, jolla tuli voimaan turvetuotantokoneiden romutuspalkkio. Koko 29 miljoonan euron suuruinen tukiraha käytettiin maaliskuun loppuun mennessä. (Valtioneuvosto 2022). Kuten alla olevasta kuvasta 13 nähdään, on turpeen osuus

kaukolämmön tuotannossa enää 9 %, kun se vuonna 2012 oli vielä 19 %. Kuvassa on esitetty kaukolämmöntuotannossa käytetyt polttoaineet ja niiden osuudet vuonna 2022.



Kuva 13. Kaukolämmöntuotannon polttoainejakauma vuonna 2022. (Energiäteollisuus ry 2023)

Metsäpolttoaineiden johdannaisia ovat myös sellu- ja paperiteollisuudessa muodostuva mustaliipeä sekä erilaisissa puun kaasutusprosesseissa tehtävät kaasut. Laitokseen valittavaan polttoaineeseen vaikuttaa laitoksen koko ja sijainti, myös hinnalla on suuri merkitys etenkin fossiilisten polttoaineiden päästöoikeuksien noustessa. Kuvaan 14 on listattu eri polttoainevaihtoehtoja ja ryhmitelty niitä kiinteisiin, nestemäisiin ja kaasumaisiin polttoaineisiin.



Kuva 14. Polttoainevaihtoehtoja (Mäkelä & Tuunanen 2015, 36)

3 Vatajankoski Oy:n esittely

Vatajankoski Oy alkuperäiseltä nimeltään Vatajankosken Sähkö Oy on Pohjois-Satakunnassa toimiva energiayhtiö, jonka pääomistajia ovat Kankaanpään kaupunki ja Karvian kunta. Sillä on noin 18000 sähkönsiirtoasiakasta ja kaukolämpöverkkoja Kankaanpäässä ja Niinisalossa sekä energianmyyntiä teollisuudelle Honkajoella. Se on vuonna 1926 perustettu yhtiö, jonka tarkoitus oli alun perin valjastaa nykyisellä Kankaanpään seudulla oleva Vatajankoski tuottamaan sähköä. Ensimmäinen vesivoimala koskeen valmistui 1927 ja yritys tarjosi myös sähköasennuspalveluita sekä akkumulaattorin latauspalvelua. 1940-luvulla toimintaa laajennettiin naapurikuntaan Karviaan ja Kankaanpään keskusta sai ensimmäiset katuvalot. 1950-luvulla rakennettiin lisää vesivoimaa. 60- ja 70-luvulla toiminta laajeni ympäristökuntiin Pomarkkuun, Laviaan ja Suodenniemelle. Vuonna 1980 perustettiin Kankaanpään kaukolämpö Oy ja Suomen ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tarkoitettu kiinteän polttoaineen kaasutusreaktori käynnistettiin 1982. Laitos on sittemmin purettu ja korvattu CHP-laitoksella vuonna 1992. Samalla Niinisalon varuskunta-alueen kaukolämpöverkko liitettiin osaksi kaupungin verkkoa. (Vatajankoski.fi 2022)

2000-luvulla yritys on voittanut useita Vuoden Energiayritys -palkintoja sekä liittynyt energiatehokkuussopimuksiin ja hankkinut osuuksia CO₂-vapaasta suurtuotannosta. Toimintaa on laajennettu myös Honkajoen Kirkkokallion teollisuusalueelle höyryntuotantolaitoksella sekä myöhemmin 2014 aloitettiin biokaasun tuotanto ja sähkön tuotanto biokaasumoottori-voimalalla. Kankaanpään kaukolämpöverkkoon kuuluvat kaksi huippulämpökattilaa muutettiin öljystä uusiutuvaan bionestekaasuun vuonna 2018. Nimensä yritys lyhensi vuonna 2020 Vatajankoski Oy:ksi toiminnan laajentuessa erilaisiin energiapalveluihin pelkän sähkön myynnin lisäksi. Vuonna 2021 valmistui suuri yli 5 miljoonan investointi hukkalämpövoimalaan, jossa otetaan Knaufin kipsilevytehtaan lämpöä talteen ja syötetään kaukolämpöverkkoon. Datalämpöjärjestelmä hyödyntää servereiden hukkalämpöä muun muassa uimahallin altaiden lämmitykseen. 2022 otettiin käyttöön maailman ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tarkoitettu lämmön hiekkavarasto, johon saadaan varastoitua lämpöenergiaa jopa kuukausien ajaksi. (Vatajankoski.fi 2022) Vuoden 2022 tilinpäätöksen mukaan yrityksellä 56 työntekijää ja liikevaihto on 27,4 miljoonaa euroa. Kaukolämpöä myytiin 73,5 GWh vuonna 2022. (Vatajankoski.fi 2023, 7–8)

3.1 Kaukolämpöjärjestelmän esittely

Kankaanpään kaukolämpöverkkoon kuuluu noin 420 asiakasta ja lämmön piirissä on yli 3000 asukasta. Monet kohteista ovat kerrostaloja ja teollisuuskiinteistöjä. Verkossa on putkistoa hieman yli 50 km, joista vanhin on vuodelta 1982. Pieni osa tästä vanhimmasta betonikanavaputkistosta on uusittu kuten mainittiin kappaleen 2.2 lopussa. Verkostossa on myös yksi välipumppaamo. Putkisto on hyvässä kunnossa eikä tiedossa ole tarvetta saneeraukselle ainakaan seuraavaan vuosikymmeneen. Kankaanpään maaperä on hiekkapitoista ja putket pysyvät siinä hyvässä kunnossa. Putkiston käyttöiän oletetaan olevan lähellä sataa vuotta. Tällä hetkellä suunnitelmissa olevat toimenpiteet ja laajennukset ovat lähinnä yksittäisille uusille asiakkaille tehtäviä putkien haaroituksia, sekä toisen välipumppaamon rakentaminen lämmöntalteenottolaitokselle menevään linjaan. (Hölttä, L tiedonanto 20.10.2023)

Kuvassa 15 on esitelty sinisellä Kankaanpään kaukolämpöverkosto. Verkostokuva vastaa kuva on mallinnettu digitaaliseen kaksoseen ja siihen on lisätty asiakkaiden mittauspaikat. Ympyröitynä on Koskenojan alueella sijaitseva kiinteän polttoaineen laitos, jossa on myös kaasukäyttöiset lisälämpökattilat ja Pansialla sijaitseva lämmöntalteenottolaitos, joista pääosa verkoston lämmöstä tulee. Kappaleessa 3.3 on esitelty kaasukattilat sekä muut pienemmät varalämpökattilat, jotka ovat öljykäyttöisiä. Lämpöä pyritään tuottamaan mahdollisimman pienillä kustannuksilla ja hiilidioksidipäästöillä. Tähän päästään käyttämällä laitoksia tietyssä ajojärjestyksessä. Jatkuvasti tuotannossa olevien datalämpöjärjestelmien ohella ensimmäisenä ajojärjestyksessä on hukkalämpölaite, joka kattaa lämmöntarpeen noin puolen vuoden ajan. Seuraavana käynnissä on ilmavesilämpöpumppu ja kylmillä säillä käynnistetään kiinteän polttoaineen kaukolämpölaite. Kovemmillä pakkasilla avuksi käynnistetään vielä kaasukattilat.

Huipunkäyttöaika kertyi tällöin 3500 tuntia ja sen odotetaan pienenevän tulevina vuosina, kun siirrytään käyttämään enemmän CO₂-vapaata tuotantoa kuten lämmöntalteenottolaitosta ja suunnitteilla olevaa sähkökattilaa. (Hölttä, L tiedonanto 20.1.2023)

3.3 Muut varalämpökattilat

Kaukolämpöverkkoon kuuluu hajautetusti useita erikokoisia varalämpökattiloita. Voimalaitoksen yhteydessä sijaitsevien kaasukattiloiden lisäksi on paljon kevytöljykäyttöisiä kattiloita. Nykyään näiden käyttö on erittäin vähäistä uuden lämmöntalteenottolaitoksen myötä, eikä niitä juuri käytetä koekäyttöjen lisäksi. Öljyn osuus verkoston lämmöntuotannosta oli vuonna 2022 vain noin 0,03 %, joka koostui lähes täysin koekäytöistä. (Hölttä, L tiedonanto 20.1.2023) Kattilat ovat tyypiltään tuliputkikattiloita ja kahdessa suurimmassa 8 MW kattilassa on myös ekonomaiserit parantamassa hyötysuhdetta.

Voimalaitoksen yhteydessä on 8 MW ja 5 MW kaasupolttimella varustetut kattilat, joita käytetään kovimmilla pakkasilla voimalaitoksen tuotannon tukena. Myös häiriötilanteissa ne voidaan nopeasti käynnistää. Ennen öljykäyttöiset kattilat vaativat huomattavasti enemmän huoltoa, käynnistyksen kanssa oli ajoittain ongelmia ja kattiloiden puhdistus oli työlästä. Nyt kaasukäytöllä kattilat ovat erittäin varmatoimisia ja puhtaita eivätkä vaadi samassa määrin huoltoa. Uuden lämmöntalteenottolaitoksen myötä näiden kesäaikainen käyttö on vähäistä, vaikka varsinainen KPA-kattila on poissa käytöstä.

Muut alla listatut kevyttä polttoöljyä käyttävät kattilat ovat käytössä vikatilanteissa.

- Kangasmoisionkadun lämpökeskus, 8 MW kevyt polttoöljykattila ekonomaiserilla.
- Soikanpuiston lämpökeskuksen yhteisteho 6 MW. 4 MW ja 2 MW öljykattilat.
- Niinisalon lämpökeskuksen yhteisteho 7,4 MW. 6 MW ja 1,4 MW öljykattilat.
- Tapalankadun lämpökeskus 1,2 MW öljykattila.
- Kelankaaren lämpökeskus 2 MW öljykattila.

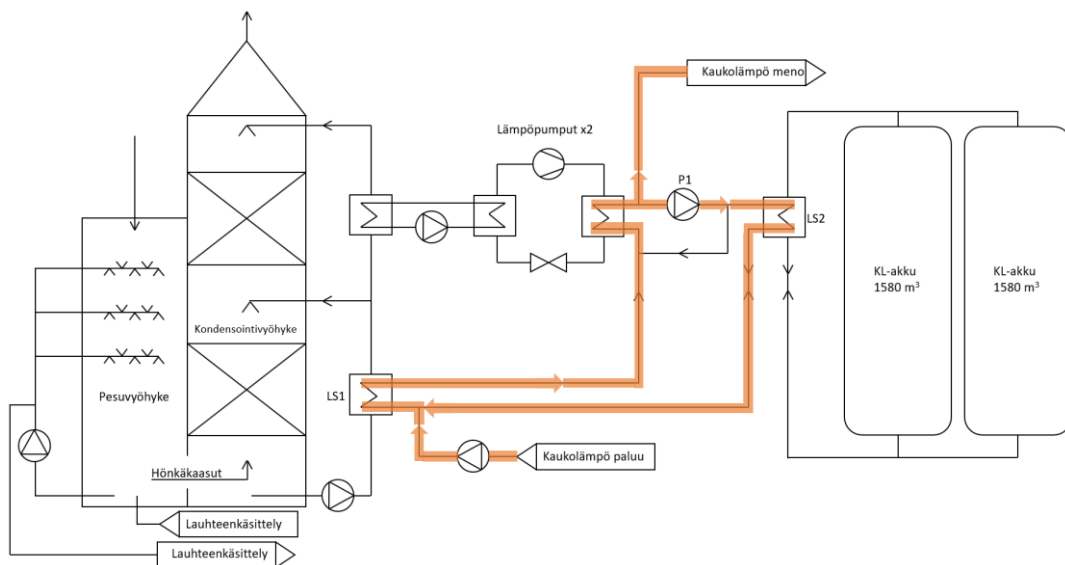
3.4 Pansian lämmöntalteenottolaitos

Maaliskuussa vuonna 2021 Kankaanpään Pansialle valmistunut hukkalämmön talteenottolaitos hyödyntää Knauf Oy:n kipsilevytehtaan hönkäkaasujen lämpöä. Kipsilevytehdas valmistaa muun muassa rakennuskipsilevyjä ja tasoitteita. Tuotteita kuivattaessa tulevia kuumia höyryjä voidaan käyttää lämmönlähteenä kaukolämmön tekemiseen. Lämpö kerätään lämpöpumpputekniikkaa käyttäen Caligo Oy:n toimittamalla hönkäkaasupesurilla. Valmistettavat tuotteet määrittelevät kuinka paljon energiaa talteenottolaitoksella voidaan saada. Eri-tyyppiset ja eri paksuiset levyt luovuttavat eri määrän kosteutta. Paksumpia levyjä tehtäessä tuotto on korkeaa ja lämmöntalteenottolaitos voi toimia maksimiteholla. Myös viikonloppuisin ja pidempinä pyhinä tapahtuvat tuotantoseisokit keskeyttävät lämmön talteenoton. Näitä seisakkeja varten Pansian laitoksessa on kaksi vesivaraajaa.

Laitos koostuu hönkäkaasujen pesurista, lauhteenkäsittelylaitoksesta sekä kahdesta lämpöpumppumoduulista. Hönkäkaasupesuri puhdistaa ja ottaa lämmön kaasuista talteen kondensoimalla ne vedeksi. Lauhteenkäsittelylaitos puhdistaa pesuvedet ja kerää epäpuhtaudet talteen kierrätettäväksi. Kaksi lämpöpumppumoduulia lauhduttaa hönkäkaasut alle 35 °C lämpötilaan. Yksi lämpöpumppu ottaa 330 kW sähkötehoa. Lisäksi laitoksessa on kaksi 1580 m³ kaukolämpöakkua, joihin saadaan varastoitua noin 180 MWh lämpöenergiaa. Energia-varasto on mitoitettu siten, että sillä voidaan kattaa kipsilevytehtaan viikonlopputauon aikainen kaupungin kaukolämmön kulutus kesäaikaan toukokuusta syyskuuhun. Ensimmäisten käyttövuosien aikana on havaittu, että varastointikapasiteettia tulisi lisätä vielä vähintään yhdellä säiliöllä. Näin voitaisiin varautua kipsilevytehtaan pidempiin käyttötauoihin ja valmistusmäärien muutoksiin. Etenkin kesäaikaan lämmöntuotantoa on ajoittain runsaasti, jolloin varastointikapasiteetista on pulaa. Lämpöpumppujen avulla lämpökustoon saadaan varattua 85 °C vettä, joka käy suoraan kaukolämpöveden lämmitykseen ilman priimausta. Laitoksen purkuteho on 5 MW. Jotta akusto saadaan varattua viikon aikana täyteen ja muuttuvaan tuotantoon sekä kulutukseen pystytään vastaamaan, joudutaan laitoksen raja-arvoja ja tehoja asettelemaan käsin, joskus jopa tuntikohtaisesti. Myös vuonna 2022 rajusti vaihdellut sähkön hinta on tuonut haasteita oikean tuotantomuodon valintaan. Huipunkäyttöajassa päästiin kuitenkin noin 5000 tuntiin. Myös näihin ongelmiin odotetaan ratkaisua tässä työssä käsiteltävältä digitaaliselta kaksoselta. (Hölttä, L tiedonanto 20.1.2023)

Normaalissa käyttötilanteessa kipsilevytehdas on tuotannossa ja hönkäkaasupesuri kondensoi lämpöenergiaa talteen. Osa lämmöstä menee kaukolämpöverkkoon ja osalla ladataan akkuja. Laitoksen yksinkertaistettu kaavio on esitetty kuvassa 16 ja siihen on oranssilla piirretty kaukolämmön kulkureitti normaalitilanteessa. Akuille menevä teho mitoitetaan niin, että ne saadaan ladattua täyteen arkipäivinä tehtaan viikonlopputaukoa varten. Lämpöakkujen purku tapahtuu pääasiassa viikonlopun aikana lämmöntalteenottolaitoksen ollessa pois päältä. Tällöin on mahdollista ajaa lämpöakut aivan tyhjiksi käyttämällä lämpöpumppuja loppuvaiheessa apuna. Lämpöakkuja on mahdollista ladata myös kaukolämmöllä, jos verkossa on ylituotantoa tai halutaan varautua suuriin tuleviin kulutushuippuihin. Latauksen aikana pesuri ei kuitenkaan voi olla käytössä, mikä rajoittaa käyttöä.

(Hölttä, L 2021a)



Kuva 16. Hukkalämpölaitoksen yksinkertaistettu kaavio normaalissa ajotilanteessa. (muokattu lähteestä: Hölttä, L. 2021b)

3.5 Datalämpö

Datalämpöjärjestelmässä hyödynnetään servereiden eli palvelinten ja laskentayksiköiden hukkalämpöä siirtämällä se nesteeseen ja lämmittämällä sillä esimerkiksi rakennusta tai muita tarvittavia kohteita. Perinteisesti palvelimet ja laskentayksiköt ovat ilmajäähdytteisiä toimintavarmuuden ja helpon huollettavuuden vuoksi. Harrastajien tietokoneissa on jo

pitkään käytetty vesijäähdytystä sen tehokkaan lämmönsiirron ja hiljaisuuden vuoksi. Muutammat yritykset ovat alkaneet valmistaa vesijäähdytteisiä palvelimia nousevien energiahintojen ja markkinoilla erottumiseksi vuoksi. Vesijäähdytyksellä saavutetaan lisää hyötyä palvelimista, kuten lämmön helppo talteenotto. Hajauttamalla pieniä muutaman palvelimen yksiköitä eri rakennuksiin saadaan lämpö käytettyä lähellä sen tuotantopaikkaa, eikä siirtohäviöitä juuri synny. Jos järjestelmää verrataan tavanomaisiin datakeskuksiin, on tämän kokoluokka murto-osa esimerkiksi Googlen palvelinsaleihin verrattuna. Järjestelmällä vältetään puhallinten ja jäähdytyskompressorien energian kulutus ja tarvitaan vain pienitehoinen kiertovesipumppu. Lisäksi laitteiden sijoituspaikka ei vaadi kuin meno- ja paluuputkiston jäähdytykselle, eikä kalliita korotettuja lattioita ja kylmä- sekä kuumakäytäviä tarvitse rakentaa.

Yksi järjestelmistä sijaitsee Kankaanpään uimahallilla, jossa kahdeksan palvelimen laskentatehoa vuokrataan yrityksille ympäri maailmaa. Hukkalämpö siirretään uima-allasveden lämmitykseen ja se kattaa puolet lämmitystarpeesta. Laitteisto ei ole kytketty osaksi kaukolämpöjärjestelmää vaan servereiden jäähdytysvesikierto lämmittää suoraan allasvesiä. Näin lämmön tuotanto ja kulutus saadaan mahdollisimman lähelle toisiaan ja välttyään siirtohäviöiltä verrattuna siihen, että lämpö tulisi kaukolämpöverkosta pitkin kauempaa. Hallin kellaritiloissa sijaitsee kahdeksan 2kW tehoista palvelinta, joista saadaan 16kW lämpötehoa allaskiertoon. Loput lämmityksestä tehdään kaukolämmöllä. Laskentatehon tarve kasvaa maailmalla jatkuvasti ja uimahallin palvelimia on käytetty muun muassa pankin tietojen prosessointiin ja animaatioelokuvan renderointiin. Palvelimissa ei säilytetä dataa eli tietoturvariskiä ei ole. Tämä helpottaa laitteistojen sijoittelua koska erityisiä lukittuja ja valvottuja tietoturvatiloja ei tarvita. (Vatajankoski.fi 2022)

Toinen palvelinkeskus sijaitsee kaukolämpölaitoksen pihamaalla lähellä uutta hiekka-akku. Tutustumiskäynnillä Vatajankoskella vuoden 2023 alussa kävi ilmi, että heillä oli käytössään 27 laskentayksikköä kahdessa eri kokoluokassa. Lisäksi tiloihin on varattu runsaasti laajennusvaraa uusille yksiköille. Keskukseen hukkalämpöä käytetään kaukolämmön tekoon. Palvelimista ei kuitenkaan voida ottaa lähes sata-asteista vettä, jotta komponentit saataisiin riittävästi jäähdytettyä. Järjestelmästä saatavaa noin 60 °C vettä käytetään kaukolämmön paluuvien lämmitykseen. Yksittäinen palvelinyksikkö on helppo liittää jäähdytinputkistoon kahdella letkulla. Järjestelmässä on oma jäähdytysvesikierto, josta lämpö siirretään lämmönvaihtimella kaukolämmön paluuveteen. Vesi priimataan hiekka-akkuun varastoidulla lämmöllä ja siirretään kaukolämpöverkkoon. (Vatajankoski.fi 2022)



Kuva 17. Vatajankoski Oy:n datalämpöjärjestelmän serverit. (Petri Lähde)

3.6 Hiekkalämpövarasto

Lämmön varastointi toteutetaan perinteisesti veteen eri kokoisten varaajien muodossa. Monilla kaukolämpöyhtiöillä kuten Vatajankoskellakin on veteen perustuvia kaukolämpöakkuja käytössä. Kankaanpäässä on 2022 otettu käyttöön Suomen ensimmäinen kaupalliseen käyttöön tarkoitettu hiekkaan perustuva lämpövarasto. Hiekkavaraston kapasiteetti on 8 MWh, sitä voidaan varata 240 kW teholla ja purkaa 100 kW teholla. (Polar Night Energy 2022)

Hiekkavaraston etuina vesivarastoon nähden on pienempi koko saman energiamäärän varastointiin, korkeampi varastointilämpötila ja pienemmät lämpöhäviöt sekä edullinen hinta. Paineettomassa vesiastiassa päästään enintään 100 °C:seen, kun Kankaanpään hiekkavarasto toimii 500 °C:ssa. Tällöin samaan tilaan saadaan varastoitua noin kaksinkertainen energiamäärä veteen verrattuna. Hiekan voi lämmittää aina 1200°C:seen, jos muut laitteiston komponentit sen kestävät. (Hurttila, E 2022, 12) Hiekka johtaa huonosti lämpöä, joten varastoitu energia säilyy pitkään, valmistaja lupaa jopa kuukausien varastointiaikaa (Polar Night

Energy 2022). Investointikustannuksiksi valmistaja ilmoittaa alle 10 €/kWh ja laitteiston käyttöiäksi kymmeniä vuosia.



Kuva 18. Hiekka-akun vihkiminen tammikuussa 2023. Paikalla elinkeinoministeri Mika Lintilä. (Petri Lähde)

Järjestelmä toimii siten, että hiekkasäiliön sisällä on useita putkia eri kehillä. Puhallin kiertää ilmaa haluttujen putkikehien läpi ja joko lataa tai purkaa lämpövarastoa. Lataaminen tapahtuu, kun puhaltimen ja hiekkasäiliön välissä olevilla sähkövastuksilla lämmitetään ilmaa. Ilma kiertää silloin ohituskanavaa pitkin eikä lämmitä kaukolämpöä. Purkaminen tapahtuu, kun ilma kulkee kaukolämmönvaihtimen läpi ja toisiokierrossa kulkee kaukolämpöä. Laitteiston kaikki osat on pitkään käytössä olleita komponentteja, joita on helposti saatavilla, myös hiekka on edullista ja sitä on helppo käsitellä.



Kuva 19. Hiikkavaraston komponentit (Hurttila, E. 2022)

3.7 Kaukokylmäjärjestelmä

Kankaanpään ensimmäinen kaukokylmän käyttäjä on 2022 peruskorjatun liikuntakeskuksen tilat. Kylmän tuotanto tapahtuu ilmavesilämpöpumpulla, joka on konttiin sijoitettu järjestelmä läheisen jäähallin pihassa. Talvella kun kylmää ei tarvita, pumpulla tuotetaan lämpöä kaukolämpöverkkoon. Pumpun on valmistanut Kalifa ja siinä on sähkötehoa noin 180 kW. Pumpussa on 500 kW lämpöteho 0 °C ulkolämpötilassa ja kesäajan teho lähes 1 MW. Kuumemmilla keleillä kesäaikaan tehdään kaukokylmää. Kylmää tehdessä laite tuottaa samalla lämpöä, joka voidaan laittaa joko kaukolämpöverkkoon tai puhaltaa ulos. Kaukokylmäverkon laajentamisesta keskustaa kohti on tehty alustavia suunnitelmia ja kartoitus mahdollisista asiakkaista. Verkkoa aletaan laajentamaan, kun mahdolliset asiakkaat tekevät hankintapäätöksiä. (Hölttä, L tiedonanto 20.1.2023)

4 Digitaalinen kaksonen

Digitaalinen kaksonen on fyysisen kohteen, kuten laitteiston tai järjestelmän digitaalinen versio. Se seuraa järjestelmän muutoksia eli se on dynaaminen ja ajan tasalla oleva digitaalinen kopio rakennetusta omaisuudesta tai ympäristöstä. Rakennustietomallinnuksen (BIM), tekoälyn (AI), koneoppimisen (ML) ja esineiden internetin (IoT) avulla kohteesta peräisin olevaa dataa käytetään digitaalisen kaksosen rakentamiseen ja parantamiseen sekä sen toiminnan mallintamiseen. Edellä mainituista datalähteistä kerrotaan tarkemmin omissa kappaleissaan. Muodostamalla tarkan ajantasaisen mallin alkuperäisestä kohteesta, digitaalinen kaksonen voi auttaa suunnittelijoita, insinöörejä, urakoitsijoita, valmistajia ja omistajia luomaan tehokkaampia rakennelmia ja järjestelmiä. Oletuksena on, että mallit on tehty oikein ja niiden tuloksia osataan käyttää oikein.

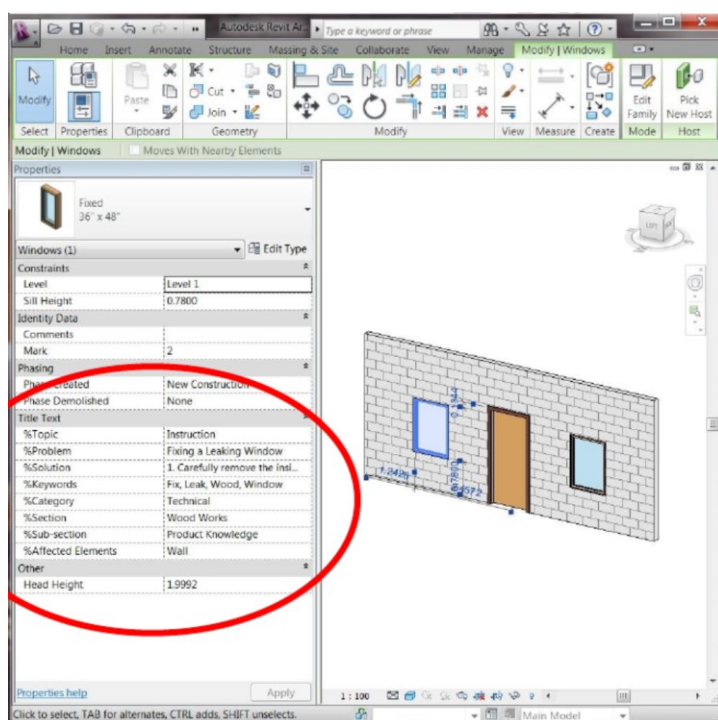
4.1 Digitaalinen kaksonen yleisesti

Digitaaliset kaksoset voivat auttaa kaikessa aina suunnittelusta ja rakentamisesta järjestelmien toimintaan ja ylläpitoon. Esimerkkinä jo suunniteltu ja rakennettu rakennus, josta on mallinnettu koko rakennuksen digitaalinen kaksoiskappale perustuksista kattoon. Siihen kuuluu mekaanisen suunnittelun lisäksi myös lämmitys, viemäröinti, ilmanvaihto ja käyttövesi eli kaikki putkistojärjestelmät ja lisäksi sähkö- sekä automaatiojärjestelmät. Kaikkien näiden järjestelmien mittaukset ja anturoinnit tarjoavat digitaaliselle kaksoselle reaaliaikaista tietoa ja se päivittyy niiden mukaan. Nyt rakennuksen omistajat voivat tarkastella eri osa-alueita, kun rakennus on ikääntynyt tai siihen tulee vikoja. Tiedon avulla he voivat suunnitella huoltoja, korjauksia ja parannuksia laajemmassa mittakaavassa ja ennakoiden. Useita digitaalisia kaksosia voidaan integroida suuremmaksi ekosysteemiksi, kuten kokonaisen korttelin tai teollisuusalueen kaikkien rakennusten mallintaminen.

Digitaaliset kaksoset saivat alkunsa 1960-luvulla. NASA oli yksi ensimmäisistä virastoista, joka käytti peilaustekniikkaa, jossa replikoitiin järjestelmät avaruudessa. NASA loi replikan Apollo 13:sta, josta tuli kriittinen sen haastavan tehtävän keskellä. Insinöörit pystyivät

testaamaan astronauttien pelastumiseen johtaneita ratkaisuja replikalla turvallisesti maassa välttääkseen lisäkatastrofit.

Tohtori Michael Greaves, joka oli edistyneen valmistuksen johtava tutkija Floridan teknologian instituutissa, esitteli digitaalisen kaksosen käsitteen amerikkalaisessa koneinsinööriyhdistyksen konferenssissa vuonna 2002. Hän ehdotti tuotteen elinkaaren hallintakeskusta, joka sisältäisi digitaalisen kaksosen elementit eli fyysisen tilan, virtuaalitalan ja tiedonkulun näiden kahden välillä. Valmistava teollisuus otti digitaaliset kaksokset nopeasti käyttöönsä, arkkitehtuuri- ja rakennusteollisuus seurasi perässä omilla teknisillä edistysaskeleillaan. Näitä olivat muun muassa BIM (Building Information Modeling) eli rakennustietomallinnus. Nykyään digitaalisella kaksoisteknologialla on suuri rooli suunnittelu-, rakennus- ja huoltoteollisuuden digitaalisessa muutoksessa. Kuvassa 20 on esitetty huolto-ohjeita seinäelementin tiedoissa Autodesk Revit BIM -ohjelmistossa.



Kuva 20. Huolto-ohjeita rakennustietomallissa. (Motawa, I. Almarshad, A. 2013)

Digitaalisen kaksosen tekeminen alkaa rakennuksen tiedoista, sen ominaisuuksista ja tiiloista. Tämän tyyppinen kuvaileva geometrinen kaksonen on kopio fyysisen maailman kohteesta, se on reaaliaikainen muokattava versio suunnittelu- ja rakennustiedoista. Pelkät tiedot

eivät vielä tee siitä digitaalista kaksosta, vaan tarvitaan tiedonvaihtoa mallin ja todellisen maailman välillä. (Nordic BIM 2022)

Lisäämällä kaksoseen kerros toiminnallista informaatiota ja aistitietoa eli enemmän dataa, kaksosesta tulee tarkempi ja se on entistä lähempänä todellista vastinettaan. Ennustavat kaksoset pystyvät hyödyntämään näitä operatiivisia tietoja oivalluksiin, kun taas kattavat kaksoset simuloivat tulevaisuuden skenaarioita ja pohtivat mitä jos -kysymyksiä. Tulevaisuudessa kaksosista tulee autonomisia, jolloin ne kykenevät oppimaan ja toimimaan käyttäjien puolesta. Digitaaliset kaksoset voivat kerätä tärkeää tietoa esimerkiksi väestönkasvusta, luonnonvaroista ja historiatietoja ympäristökatastrofeista. Tiedon avulla ne voivat auttaa rakentamaan kestävämpiä kaupunkeja ja infrastruktuuria maailman muuttuessa. Lopulta koko digitaalisten kaksosten ekosysteemi auttaa teollisuutta vastaamaan globaaleihin haasteisiin voimakkailla samanaikaisilla muutoksilla. Tällä hetkellä ne auttavat operaattoreita ja toimijoiden hoitajia reagoimaan nopeammin poistamalla monimutkaisten ja aikaa vievien huoltoasiakirjojen tarpeen. Omistajat voivat kerätä tietoa suunnittelu- ja rakennusvaiheista tehdäkseen nopeampia liiketoimintapäätöksiä ja alentaa käyttö- ja ylläpitokustannuksia. Paikalla olevat ammattilaiset voivat ennustaa materiaali- ja työkiertoja, vähentää jätettä ja parantaa turvallisuutta. Digitaaliset kaksoset auttavat ammattilaisia saamaan paremman näkemyksen järjestelmien sisäisestä toiminnasta. Digitaalisista kaksosista on tulossa yleisiä kumppaneita paremman tulevaisuuden rakentamisessa. (Redshift 2022)

4.2 Päätyypit

Digitaaliset kaksoset voidaan jakaa neljään päätyyppiin sen mukaan, mitä tasoja järjestelmässä ne hoitavat. Päätyypit ovat pienimmästä suurimpaan kokonaisuuteen komponentti-, tuote-, järjestelmä- ja prosessikaksoset.

Komponentti- tai osakaksoset ovat digitaalisia malleja yksittäisistä komponenteista tai osista, kuten moottoreista, antureista, kytkimistä ja venttiileistä. Ne tarjoavat yksityiskohtaista tietoa komponentin suorituskyvystä ja käyttäytymisestä reaaliajassa. Lisäksi voidaan ennustaa tulevia tapahtumia ja käyttäytymistä vanhoja tietoja apuna käyttäen. Tämä auttaa käyttäjää seuraamaan näiden komponenttien kuntoa ja suorituskykyä ja tekemään tarvittavia

muutoksia. Yksittäisten komponenttien virtuaaliset esitykset antavat käyttäjille mahdollisuuden ymmärtää osan fyysisiä, mekaanisia ja sähköisiä ominaisuuksia.

Omaisuus- tai tuotekaksoset ovat digitaalisia malleja fyysisestä omaisuudesta, kuten rakennuksista, koneista ja ajoneuvoista. Ne tarjoavat reaaliajassa tietoa omaisuuden toimintatilasta, suorituskykytiedoista ja ympäristöolosuhteista. Ne kuvaavat, kuinka yksittäiset komponentit toimivat yhdessä esimerkiksi lämpökeskuksessa. Tuotekaksonen voi saada tietoja komponenttikaksoselta laitteista ja tämän jälkeen päätellä kuinka laitteet toimivat yhdessä. Tämä auttaa organisaatioita vähentämään seisokkeja ja tehostamaan toimintaansa, kun vikojen ja korjausten aikaa voidaan ennakoida tarkemmin. Laitteiden toimintaa ja yhteensopivuutta voidaan parantaa, jolloin suorituskyky nousee ja energiankulutus laskee.

Järjestelmäkaksoset ovat digitaalisia malleja kokonaisista järjestelmistä tai prosesseista. Niiden avulla organisaatiot voivat seurata ja analysoida järjestelmän suorituskykyä ja tunnistaa alueita, joilla voidaan tehdä parannuksia. Järjestelmäkaksosten avulla organisaatiot voivat optimoida prosessejaan ja parantaa toimintatapaansa. Kyseessä voi olla koko kaukolämpöverkko, jossa järjestelmäkaksonen valvoo kaikkia tuotekaksosia ja kerää näiden tiedon yhteen. Se pyrkii parantamaan kaikkien osien välistä yhteistyötä. Se mahdollistaa järjestelmän tarkan seurannan erittäin tarkasti ja antaa mahdollisuuden kokeilla muutosten vaikutusta ennakoon.

Prosessikaksoset ovat digitaalisia malleja kokonaisista liiketoimintaprosesseista tai asiakaskokemuksista. Ne tarjoavat yksityiskohtaista tietoa siitä, kuinka asiakkaat ovat vuorovaikutuksessa organisaation tuotteiden ja palvelujen kanssa reaaliajassa. Tämä auttaa organisaatioita tunnistamaan alueita, joilla asiakaskokemusta voidaan parantaa. Sitä voidaan käyttää myös prosessien ja työnkulkujen yhdistämiseen, sekä optimoimaan huoltoja tuotannon kannalta sopiviin vaiheisiin. Sillä voidaan tarjota yritysten johdolle seurantatietoa ja keskeisiä liiketoiminnan mittareita paljon datalähtöisemmällä tavalla kuin aiemmin on ollut mahdollista. Sillä voidaan yhdistää energiamarkkinat, säätiedot ja tuotantoon vaikuttavat tekijät kuten laitteiden kapasiteetit, huollot ja polttoainetilanteet kaukolämpöverkon käytön optimoimiseksi. (Tributech 2019, Digital Directions 2022)

4.3 Rakennustietomallinnus (BIM)

Rakennustietomallinnuksella tarkoitetaan automatisoitua tiedon käyttämistä. Siinä hyödynnetään CAD (Computer Aided Design) ohjelmilla luotuja tietoja. Nämä suunnitelmatiedostot ovat tarkkoja malleja esimerkiksi rakennuksesta, jotka sisältävät kaikki suunnitelmat aina seinärakenteista, sähköistä ja LVI-suunnitelmista lattioiden pintamateriaaleihin. CAD-tiedostot tuodaan osaksi rakennustietomallia ja siihen lisätään tietoja materiaaleista ja eri vaihtoehtoista sekä lisätään kustannustietoja ja toimittajia. Siinä olevia tietoja voidaan päivittää ja muutokset näkyvät kaikilla osapuolilla kaikissa näkymissä yhtä aikaa. (Tekla 2022) Tietomallia käytetään suunnittelu- ja rakennusvaiheessa, jolloin tilaajalla on mahdollisuus kulkea virtuaalisesti tulevaisuuden tiloissa ja tutustua materiaali- ja tilaratkaisuihin. Myöhemmin rakennuksen valmistuttua mallia voidaan käyttää tietopankkina, josta löytyy kaikkien rakenteiden, putkistojen ja materiaalien viimeisimmät tiedot.

Rakennustietomalli voidaan edelleen tuoda osaksi digitaalista kaksosta ja lisätä siihen tietoja osien huoltotarpeesta ja aikataulusta, luoda vaihtelevaa dataa rakennuksen käyttöasteesta ja säätilasta. Näillä tiedoilla voidaan jo suunnitteluvaiheessa tuoda suunnittelijoille ja tuleville käyttäjille ilmi mahdollisia muutostarpeita ja auttaa materiaalivalinnoissa, jotta rakennuksen toimivuus ja käyttöikä saadaan maksimoitua. (Redshift 2022) Lisäksi käytön aikana todellisten mittaustietojen perusteella on mahdollista lisätä ennustettavuutta muun muassa sähkön kulutuksesta sekä tuotannosta esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmällä.

Kauppakeskus Sellossa on toteutettu virtuaalivoimalaitos ja älykäs energiajärjestelmä käyttämällä hyväksi digitaalisen kaksosen tietoja. Siinä kerätään tietoja sähköautojen latauspaikkojen kulutuksesta, rakennuksen muusta sähkönkäytöstä, aurinkosähköjärjestelmän tuotosta ja säätilasta. Seuraavan vuorokauden ennustemalli lasketaan kerran päivässä ja siinä käytetään mittaushistorian ja Ilmatieteenlaitoksen säädatan lisäksi aikatieitoja kuten kuukausi, arki- tai pyhäpäivä ja suositut kellonajat sekä energian hinta. Näiden perusteella luodaan ennuste kulutuksesta ja tuotannosta, jonka perusteella voidaan tehdä hienosäätöä omaan kulutukseen ja tarjota ylimääräistä energiaa myyntiin. (Piira, K 2023)

4.4 Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä

Yhdysvaltalaisen maanmittauslaitteita ja järjestelmiä valmistavan Trimblen NIS (Network Information System) verkkotietojärjestelmä muistuttaa BIM-järjestelmiä, mutta nojaa vahvasti paikannukseen. Se on tarkoitettu vesi-, kaukolämpö- sekä sähköverkoja ylläpitäville yrityksille. Siihen tallennetaan verkoston tiedot ja sijainnit paikkakoordinaatein. Siihen voidaan yhdistää digitaalisen kaksosen ominaisuuksia kuten elinkaaritietoja. (Trimble NIS 2021)

Erityisen hyödyllinen järjestelmästä tulee, kun siihen yhdistää Trimble SiteVision järjestelmän, jolla voidaan lisättyä todellisuutta hyväksi käyttäen nähdä esimerkiksi kaukolämpöjärjestelmän putkilinjat niin kuin ne todellisuudessa maan alla menevät. Yhdistämällä tämän näkymän digitaaliseen kaksoseen saadaan samalla nähtyä putkien ikä, venttiilien ja muiden laitteiden tiedot ja vaikka sen hetkinen virtaus putkessa. Seuraavassa kuvassa 21 on esitetty miltä mahdollinen putkistomalli näyttää SiteVision-mallissa, kun sitä katsotaan kohteessa puhelimen näytöstä paikkatiedon kanssa. (Trimble SiteVision 2021)



Kuva 21. SiteVision näkymä Trimble NIS järjestelmässä. (Trimble SiteVision 2021)

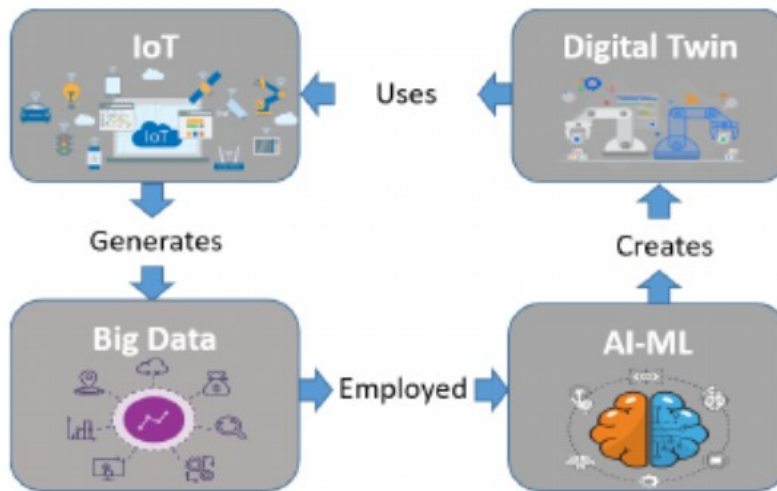
4.5 Esineiden internet

Digitaalisen kaksosen luotettava toiminta vaatii suurta datamäärää eri puolilta järjestelmää. Tietojen keräämiseen voidaan käyttää esineiden internetiä (IoT, Internet of Things), jossa jokainen laite ja mittari välittää tiedot toiminnastaan ja mittaamistaan arvoista keskitettyyn järjestelmään. Tiedonvälitys voi tapahtua laitteiden väyliä pitkin, langattomalla verkolla, RFID (Radio Frequency IDentification) tai NFC (Near Field Communication) tekniikalla tai muilla kommunikointitavoilla (Gokhale, P. 2018, 42). Ilman ajantasaista mittausta ja laitteiden tilatietoja ei saada oikeaa kuvaa järjestelmien toiminnasta. Kun kaukolämpöjärjestelmässä jokainen kulutuskohde varustetaan tietoverkkoon kytketyillä antureilla ja älykkäällä ohjauksella, saadaan verkosta kaikki tarvittava tieto sen energiankulutuksesta. Jo pidemmän ajan kaukolämpöyhtiöillä on ollut tieto kaikista järjestelmässä olevista pääkomponenteista, kuten pumpuista ja venttiileistä sekä monia virtaus- ja painetietoja. Asiakkaiden kulutustietoja ei kuitenkaan lueta reaaliajassa. Laajentamalla mittausjärjestelmää asiakkaiden

lämpökeskuksiin voidaan saada ajantasaista ja tarkkaa tietoa kulutuksen muutoksista. Keräämällä dataa pidemmällä aikavälillä voidaan alkaa luomaan malleja ja ennustamaan tulevia tapahtumia tekoälyn ja digitaalisen kaksosen avulla.

4.6 Tekoäly ja koneoppiminen

Tekoäly (AI, Artificial Intelligence) on ihmisen kognitiivisten taitojen kuten oppimisen, päättelyn ja kehittymisen digitaalista matkimista. Digitaalinen oppiminen on tietokonealgoritmien eli sääntökokoelmien suorittamista suuriin datamääriin. Dataa voidaan kerätä erilaisista antureista, verkkopalveluista, järjestelmän mittareista ja IoT-laitteilta. Näistä datamääristä, joita myös big dataksi kutsutaan, voidaan tehdä hyödyllisiä johtopäätöksiä ja löytää merkittäviä tekijöitä sekä yhtäläisyyksiä, joita ihminen ei välttämättä havaitse. Tekoäly etsii oikeita algoritmeja, joilla se pääsisi haluttuihin lopputuloksiin. Kun tekoäly oppii ja kehittyy, se pystyy tarkentamaan ja nopeuttamaan algoritmejaan. Tekoälyyn liittyy paljon muita tiedon käsittelyn ja prosessoinnin tekniikoita. Kun tekoäly luo ennusteita ja tekee päätöksiä, se saa tarvitsemansa tiedot muilta. Tekoäly onkin sekoitus useita erilaisia tekniikoita ja niitä on joskus vaikea erottaa toisistaan. Pääosaa tekoälyjärjestelmistä ohjaa koneoppiminen (ML, Machine Learning). Sen osia ovat esimerkiksi syväoppiminen (deep learning) joka voi luokitella tietoa ja tunnistaa vaikka puhetta tai kuvia, sekä datan louhinta (data mining), jossa suuresta määrästä kerättyjä arvoja koostetaan yleistajuisia esityksiä ja niitä voidaan visualisoida. Seuraavassa kuvassa 22 esitetään kuinka järjestelmät suhtautuvat toisiinsa. Siinä tekoäly luo tietoa koneoppimisen avulla digitaaliselle kaksoselle, käyttäen big datan louhimia tuloksia. Digitaalinen kaksonen ohjaa verkkoon liitettyjä IoT-laitteita, joiden tuottama data päätyy suureen datankeräysjärjestelmään. (Rathore, M. et al 2021, 32038–32039)



Kuva 22. Digitaalisen kaksosen liittyvät tekniikat ja niiden tiedonjako. (Rathore, M. et al 2021)

4.7 Gradyentin lyhyt yritysesittely

Vatajankoski Oy:lle hankitun simulointiohjelmiston ja digitaalisen kaksosen mallintaa Alankomaista Rotterdamista kotoisin oleva yritys Gradyent. Se on ohjelmistoyritys, jonka tavoitteena on tehostaa lämmitysjärjestelmiä. Yritys on nuori vuonna 2019 perustettu yritys, joka kasvaa voimakkaasti. Vuonna 2022 Helen energiayhtiön sijoitusosana Helen Ventures sijoitti Gradyentiin yhteissumman 10 miljoonaa euroa yhdessä belgialaisen Capricorn Partnersin, Alankomaalaisen Energiiq:n sekä Alankomaissa toimivan energiayhtiön Enecon kanssa (Helenventures.fi 2022). Yrityksellä on jo useita suuria kaukolämpöasiakkaita kuten E.ON, Uniper, Helen, Turku Energia, Eneco ja Wien Energie, sekä nyt pieni Vatajankoski Oy. Gradyentin mukaan 26 % kaikesta energiasta käytetään rakennuksien lämmitykseen ja kolmannes tästä energiasta menee hukkaan. Kaukolämpöjärjestelmien lämmöntuotannon muuttaminen uusiutuviin ja CO₂-vapaisiin energialähteisiin on tehokas tapa tehdä suuria parannuksia energiajärjestelmään. Ongelmana on, että verkosto muuttuu vaikeasti hallittavaksi. Heidän tarjoamansa digitaalinen kaksonen ja tekoälymallinnus auttaa verkon ja tuotannon hallinnassa. (Gradyent.ai 2022)

4.8 Gradyentin digitaalinen kaksonen

Gradyentin toimittama kaukolämpöverkon digitaalinen kaksonen toimii pilvipohjaisesti ja on tarkoitettu verkon optimointiin ja suunnitteluun. Ohjelman ydin on mallinnus kaukolämpöverkosta, johon yhdistetään maantieteelliset tiedot, anturi- ja mittaustiedot, tuotantotiedot sekä sää- ja hintatiedot. Näiden perusteella ohjelma luo oppivaa tekoälyä apuna käyttäen skenaarioita ja mahdollistaa kaukolämpöverkon tilan, suorituskyvyn ja tulevaisuuden skenaarioiden visualisoinnin ja analysoinnin. Sillä voidaan löytää parhaat ratkaisut lämpöverkon laajentamiseen, kunnossapitoon ja se auttaa verkon laajennuksia tai muutoksia suunnitella. (Gradyent.ai 2022)

4.9 Digitaalinen kaksonen Helenin käytössä

Gradyentin digitaalinen kaksonen on ollut Suomessa pisimpään Helenin käytössä. Verkon mallia on rakennettu ohjelmaan vuodesta 2021. Kävin aiheesta sähköpostivaihtoa Helenin kehityspäällikkö Niko Moreiran kanssa lokakuussa 2023 ja seuraavat tiedot perustuvat näissä viesteissä käytyihin keskusteluihin. Kysymykset liittyivät ennako-odotuksiin, ohjelman käyttöönottoon, ohjelman ominaisuuksiin, ylläpitotarpeeseen, ohjelman käyttäjiin, kokemuksiin ja asiakkaiden mahdollisesti saamiin hyötyihin.

Helenillä on tavoitteena olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä ja näin ollen päästä hiilivoimasta eroon ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Odotukset ohjelmalta liittyvät näihin ylemmän tason tavoitteisiin kuten energiavarmuus, ympäristövastuullisuus ja biodiversiteetti. Sillä pyritään hallitsemaan infraa ja lämmön sekä jäähdytyksen tuotantoa niin, että päästään alkuvaiheessa seuraaviin tavoitteisiin:

- Huolto- ja energiavarmuuden parantaminen
- Päästöjen alentaminen vähentämällä ja korvaamalla kivihiilen käyttöä
- Energiantarpeen optimointi
- Lämpöhäviöiden vähentäminen verkostossa
- Ennakoiva mukautuminen ilmasto-olosuhteisiin älykkäällä verkolla ja tuotannolla

- Lämmön älykäs talteenotto ja hyödyntäminen

Digitaalisen kaksosen käyttöönotto on edennyt useassa vaiheessa ja alkoi runkoverkon mallinnuksella. Siinä yhdistettiin verkon fysikaalinen malli koneoppimiseen. Aluksi mallia kalibroitiin tekemällä virtuaalisia verkon ajoja ja näitä tuloksia verrattiin toteutuneeseen verkon toimintaan vuoden aikana kerättyä dataa hyväksi käyttämällä. Myöhemmissä vaiheissa mallia kehitettiin vastaanottamaan reaaliaikaista tietoa suoraan SCADA-valvomo-ohjelmasta ja sitä voitiin täydentää asiakaskohtaisella datalla. Nyt mallilla saadaan toteutettua end-to-end ratkaisu, joka kattaa digitaalisen mallinnuksen tuotannosta asiakkaan kulutuskohteeseen saakka.

Suurimpana haasteena mallin käyttöönotossa on saada lukuisista eri järjestelmistä erityyppiset datat järjestelmän luettavaan muotoon automaattisesti. Asiaa vaikeuttaa entisestään verkkojen turvallisuusratkaisut ja kokonaisuudet, joissa on useita eri järjestelmiä eritasoisilla suojausmekanismeilla ja protokollilla varustettuna. Kaiken datan tulisi virrata automaattisesti oikeassa muodossa Gradyentin pilveen, eivätkä mahdolliset tuotantolaitteistojen huoltotoimenpiteet saisi sotkea tiedonkeruujärjestelmää. Tällä hetkellä malli on pienen porukan testikäytössä, jossa validoidaan ja kalibroidaan mallia, jotta se on täysin yhteensopiva SCADA-järjestelmän kanssa ja tuottaa oikeita sekä luotettavia tuloksia.

Mallia pystyy käyttämään verkkosovelluksella, josta saa tilannenäkymän virtuaaliverkon kokonaistilasta. Käyttöliittymä on helppokäyttöinen eikä vaadi erityistä tietoteknistä osaamista. Mallissa voi seurata todellisen verkon tilaa ja se mahdollistaa verkon analyttisen tarkastelun eri näkökulmista kuten verkkopaineista, lämpötiloista ja asiakaskohteista valitulla verkon osuudella. Tavoitteena on, että ratkaisulla pystytään tuottamaan optimoituja arvoja, joilla tasataan lämmön ja paineiden vaihteluita ja tasoitetaan piikkejä, varaudutaan tulevan vuorokauden säävaihteluihin sekä otetaan mukaan lämpöpumppulaitoksia ja lämmön varastointia. Digitaaliselle kaksoselle on Helenillä kasattu suuret odotukset tasapainottamaan lämmöntuotantoa optimoidusti, kun siirrytään kivihiilen käytöstä pois. Tällä hetkellä Gradyentin järjestelmän ylläpito edellyttää Heleniltä kykyä toimittaa päivittyvää laitosten, verkon ja asiakkaiden dataa, jota ei ole välttämättä saatavilla automaattisesti järjestelmistä.

Kokemuksena järjestelmän käytöstä mainittiin testi, joka suoritettiin Torpparinmäen alueella. Alueella vertailtiin Gradyentin mallinnuksen tuottamaa tulosta verkon todelliseen tilaan ja havaittiin, että mallinnus vastaa erittäin hyvin todellisuutta haastavassa kohteessa.

Torpparinmäen mittauspiste sijaitsee kaukana tuotantolaitoksista ja tämän takia verkkoon kohdistuu siellä erityisiä vaatimuksia liittyen muun muassa verkon paineisiin. Gradyentin mallinnus pystyi haastavasta kohteesta huolimatta analysoimaan paineiden käyttäytymistä ja niiden aiheuttajia erittäin vakuuttavalla tavalla.

Kehityksen ollessa vielä kesken, eivät Gradyentin digitaalisen kaksosen hyödyt vielä juuri näy asiakkaille. Epäsuoria hyötyjä tulee, kun kaukolämpöjärjestelmää ja lämmöntuottolaitoksia voidaan ajaa kustannustehokkaammin ja hiilen käytöstä päästään eroon ilman massiivisia uusia investointeja. Joitain asiakkaille suoraan näkyviä ratkaisuja kerrottiin olevan tulossa lähivuosina. Näistä ratkaisuista ei kuitenkaan vielä puhuttu tarkemmin niiden ollessa vasta kehityksensä alkuvaiheessa.

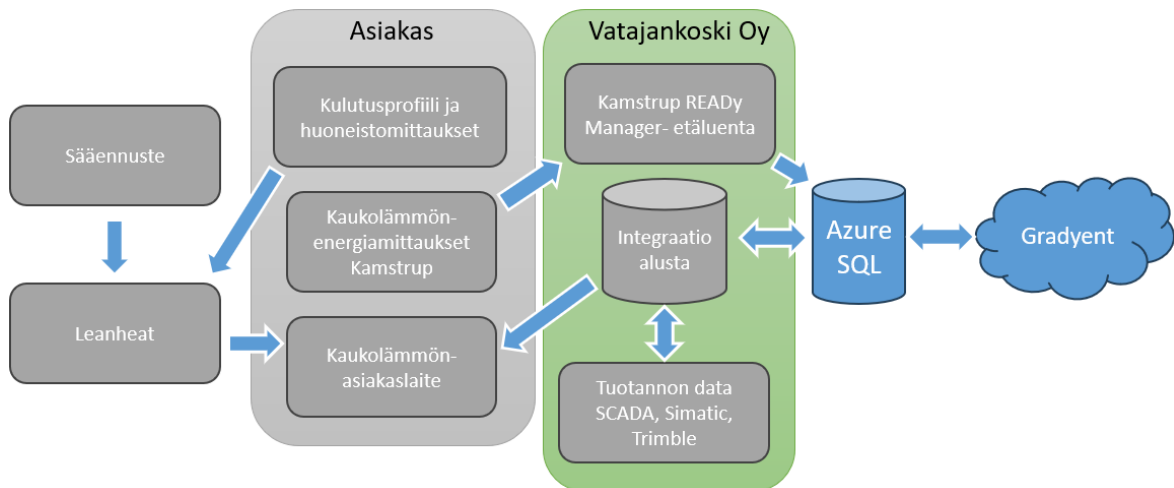
5 Digitaalinen kaksonen Vatajankoski Oy:n käytössä

Gradyentin digitaalinen kaksonen valittiin Vatajankoski Oy:n käyttöön syksyllä 2022. Järjestelmän piti olla käyttöönottokunnossa alkuvuodesta 2023, mutta mallia rakennettaessa havaittiin kehitystarvetta tiedonkeruujärjestelmiin. Useiden eri tietojärjestelmien kuten tuotannon tietojen, kaukolämpöverkon tietojen ja asiakkaiden kulutustietojen ja kulutusprofiilien yhdistäminen digitaaliseen kaksoseen paljastui nopeasti arvioitua työläemmäksi. Haasteita loi tarve saada mittaustiedot liikkumaan Gradyentille, jotta pilvessä toimiva digitaalinen kaksonen saa laskentaa ja ennustuksia varten tarvittavan datan. Lisäksi tiedon tulisi liikkua myös toiseen suuntaan, jotta laskentojen perusteella tehtävät ohjaukset saadaan toteutettua tuotannossa ja kaukolämpöverkossa. Tämän lisäksi järjestelmän tulee olla hyvin tietosuojattu ja mahdollisten ongelmatilanteiden varalta nopeasti otettavissa takaisin käyttäjien ajettavaksi. Näiden haasteiden takia digitaalinen kaksonen saatiin käyttöön vasta syksyllä 2023. Tässä vaiheessa järjestelmä oli vasta osittain toiminnassa ja siitä puuttui vielä tarkempi asiakasdata. Tätä varten tulee päivittää kaikille kaukolämpöverkon asiakkaille reaaliaikaisesti etäluettavat mittarit.

Tässä kappaleessa esitellään digitaalisen kaksosen tietojärjestelmää ja siihen liittyviä mittausjärjestelmiä sekä perehdytään eri näkymiin ja tietoihin mitä ohjelmisto tarjoaa.

5.1 Tietojärjestelmän kuvaus

Tietosuojavaatimuksia varten rakennettiin Gradyentin järjestelmän ja Vatajankoski Oy:n järjestelmien väliin Azuren SQL tietokanta, jonne tietoa lähetetään ja josta sitä luetaan. Näin se toimii puskurina ja estää suoran yhteyden Gradyentin pilvestä kriittisiin voimalaitosten ohjausjärjestelmiin. Alla olevassa kuvassa 23 on esitettyä yksinkertaistettu kaavio eri tiedoista ja kuinka ne kulkevat järjestelmässä ja tämän jälkeen laatikoista on tarkemmat selostukset.



Kuva 23. Yksinkertaistettu kaavio tiedon kulusta Vatajankoski Oy:n digitaalisessa kaksosessa (Petri Lähde)

LeanHeat on Danfossin omistama lämmitysjärjestelmien IoT-ratkaisu, jolla ennakoidaan ja ohjataan lämmitystä säätietojen ja asiakkaan kulutusprofiilin perusteella. Järjestelmään kuuluu myös huoneistoissa olevat lämpötilamittarit, joilla asuntojen toteutunutta lämpötilaa voidaan mitata. Rakennukselle se tarkoittaa tasaisempaa lämpötilaa säätötilan vaihdellessa nopeasti. Kaukolämpöyhtiölle se lisää kulutuksen ennustettavuutta ja vähentää kulutuspiikkejä. Kulutuspiikkien tasaamisesta pyritään saamaan hyötyä myös asiakkaalle matalampina perusmaksuina. Järjestelmä kerää asiakkaiden kulutustiedot ja välittää ne integraatioalustalle. Lisäksi lämmityksen optimoinnin kautta voidaan automaattisesti ohjata kulutusta parhaalla mahdollisella tavalla. Esimerkiksi mahdollisen lämpöverkon vikatilanteen aikana voidaan kulutusta rajoittaa ja ohjata vuorotellen eri asiakkaille.

Gradyentiltä on tilattu ratkaisu, joka korvaa LeanHeat-järjestelmän. Sillä saadaan kerättyä ja tuotettua samat tiedot ja ennusteet mitä LeanHeatillä, mutta lisäksi se osaa huomioida kaiken kaukolämpöverkossa tapahtuvan ja optimoida koko järjestelmää tuotannosta kulutukseen. Se on siis niin sanottu end-to-end ratkaisu.

Kaikkiin asiakaskohteisiin päivitetään kaukolämmön energiamittausta varten etäluettavat Kamstrupin mittarit, joiden keräämää dataa hallitaan READY manager -ohjelmistolla. Kerättyjä mittaustietoja päivitetään Gradyentin suuntaan viikkotasolla. Ilmoitus uusista, saatavilla olevista mittauksista voidaan toteuttaa automaattisesti integraatioalustalta.

Kaukolämmön asiakaslaitteen tulee pystyä ottamaan vastaan Gradyentin tuottamaa ennustetdataa. Asiakkaille asennetaan tarvittavat laitteet, joissa on API-ohjauksen sisältävät säätölaitteet.

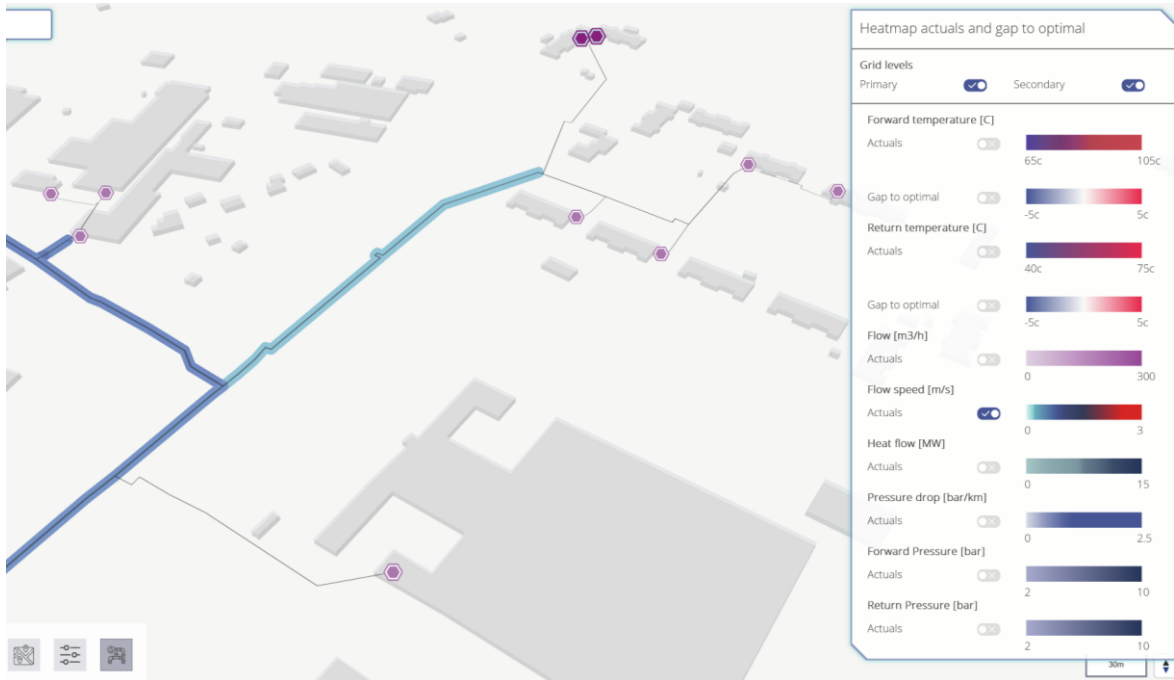
SCADA ja Simatic ovat valvomo-ohjelmistoja, joilla ohjataan prosesseja eli voimaloita, kat-tiloita, pumppuja ja muita laitetta. SCADA-ohjelmalla voidaan ohjata useiden eri valmistajien automaatiolaitteita ja Simatic on Siemensin laitteille tarkoitettu ohjelmisto. Trimble tuo kaukolämpöverkon tietoja, kuten huoltotoimenpiteiden ja virtauksien tietoja tietomalliin.

Azure on Microsoftin tietoturvallinen pilvipalvelu, jossa voidaan pitää esimerkiksi SQL tietokantaa. Tietokantaan voidaan antaa luku- ja kirjoitusoikeuksia tarvittavalla laajuudella, eikä sieltä käsin pääse käsiksi lämmöntuotantojärjestelmiin. Tietokanta varmuuskopioituu automaattisesti ja tieto on paremmassa tallessa. Se toimii paikkana, josta Gradyent voi lukea Vatajankoski Oy:n sinne laittamia tuotannon ja kulutuksen tietoja ja tuoda niiden perusteella tehtyjä ennustuksia ja ehdotuksia luettavaksi.

5.2 Karttapohjan lämpökartat

Digitaalisen kaksosen karttapohjaan piirrettyihin kaukolämmön putkilinjoihin on mahdollista saada erilaisia tietoja lämpökarttojen muodossa. Lämpökartoissa erilaiset olosuhteet voidaan esittää liukuvilla väreillä. Näin erilaiset tiedot ovat käyttökäyttäjälle helposti nähtävillä ja ymmärrettävissä verrattuna siihen, että olosuhteiden arvot olisi esitetty numeroilla ja teksteillä jokaisessa putkessa erikseen. Tutuin näistä lienee lämpötilan esitys niin että viileimmät alueet ovat sinisiä ja kuumimmat punaisia. Kuvasta on erittäin helppo nähdä muiden putkien väreistä poikkeavia linjoja ja löytää näin mahdollisia vikatilanteita tai muuten heikommin toimivia linjoja. Kartoilla on mahdollista liikkua myös ajassa taaksepäin, jolloin voidaan etsi vikatilanteiden lähtösyitä ja seurauksia sekä ongelmien etenemistä verkossa. Näiden pohjalta voidaan analysoida vian kokonaisvaikutuksia. Kuvassa 24 on esitetty palanen kaukolämpöverkkoa, jossa on tällä hetkellä virtausnopeuden näyttö päällä. Kuvan ottohetkellä vain runkolinjojen virtaustiedot olivat saatavilla, mutta mallin täydentyessä valmiiksi saadaan kaikkien kulutuskohteiden tiedot yhdistettyä ja lisämittausten avulla asiakkaille menevien oksien virtaustiedot selville. Kuvan yläreunassa keskivaiheilla nähdään kaksi reaaliaikaisessa mittauksessa olevaa asiakasta, jotka on merkitty tummalla

kuusikulmiolla. Kuvanottohetkellä muut mittauskohteet eivät olleet vielä reaaliaikaisessa mittauksessa, mutta tavoitteena on saada nekin mittaukseen alkuvuoden 2024 aikana.



Kuva 24. Ote digitaalisen kaksosen lämpökartasta eli Heat map:istä

Kuvan 24 oikeassa reunassa nähdään lämpökarttojen valintoja, jotka voi laittaa päälle liuku-kytkimellä. Seuraavaksi esitellään valittavana olevat tiedot ylhäältä lukien.

Valittavana on putkiston lämpötilan esitys joko menoputkessa (Forward temperature) tai paluuputkessa (Return temperature). Molemmista putkista voidaan valita esitystapa kahdesta eri vaihtoehdosta. Valittavana on joko putken todellinen lämpötila (Actuals) tai poikkeama optimilämpötilasta (Gap to optimal). Näillä lämpötilanäytöillä pystytään seuraamaan kaukolämpöveden lämpötilan riittävyttä eri puolilla verkkoa nopeasti yhdellä silmäyksellä. Lämpötilarajoja voidaan muuttaa asetuksista tarpeen mukaan ja myös väriskaaloille on vaihtoehtoja, jos käyttäjällä on rajoitteita värien näkemisessä.

Seuraavana valittavana tietona on virtaus kuutioina tunnissa (Flow [m³/h]) jolla pystytään seuraamaan toteutuneita virtausmääriä ja arvioimaan mahdollisten laajennusten vaikutusta olemassa oleviin putkistoihin ja mahdollista tarvetta putkikoon suurentamiselle.

Kuvassa valittuna oleva virtausnopeus metreinä sekunnissa (Flow speed [m/s]). Tietoja voidaan käyttää virtausmäärän ohella uuden putkiston mitoituksen apuna ja se vaikuttaa

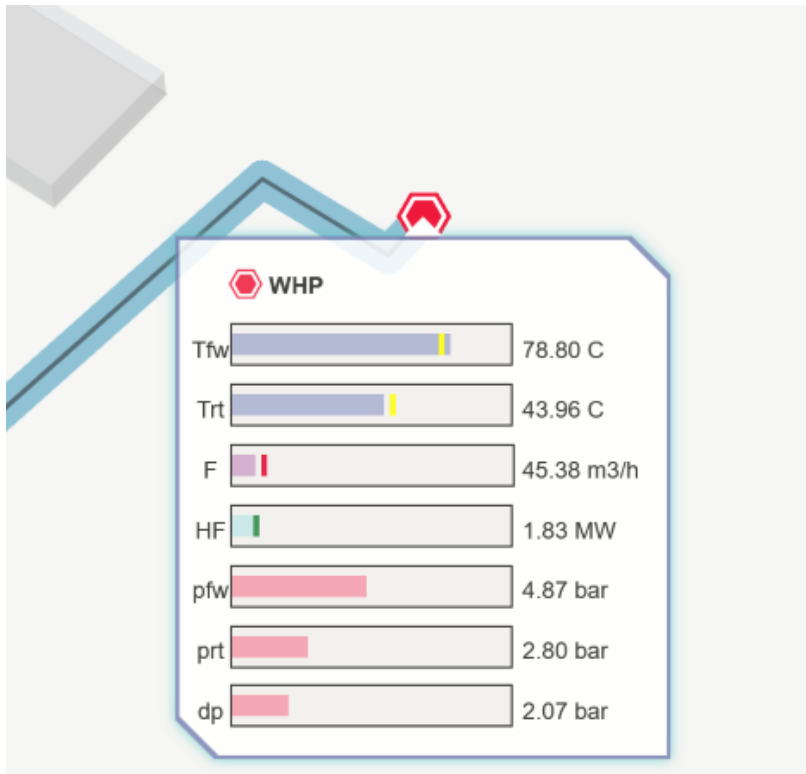
lämpöhäviöihin ja painehäviöihin. Turhan suuri virtausnopeus aiheuttaa myös suuria pump-
pauskustannuksia ja putkiston enneaikaista kulumista.

Järjestelmän tehoa (Heat flow [MW]) voidaan seurata tällä valinnalla. Tällä voidaan nopeasti
selvittää kuinka suurilla tehoilla runkolinjat siirtävät lämpöä ja mihin suuntaan se haarakoh-
dissa jakaantuu.

Kolme viimeistä valintaa liittyvät verkon paineisiin. Järjestelmässä voidaan seurata paineen
pudotusta kilometriä kohden (Pressure drop [bar/km]) tai erikseen menoputken paineita
(Forward Pressure) tai paluuputken paineita (Return Pressure). Paineita seuraamalla nähdään
nopeasti mahdolliset vuotokohdat ja verkon tasapaino, virtaustiedon ohella sillä päästään
käsiksi turhan suuriin pumppaustehoihin ja voidaan alentaa kustannuksia sekä pidentää ver-
koston käyttöikä.

5.3 Tuotantolaitoskohtaiset tiedot

WHP (Waste Heat Plant) eli hukkalämpölaitoksen tuotantotiedot kaukolämpöverkon osalta
on nopeasti nähtävillä painamalla laitoksen paikalla olevaa kuusikulmiota, kuten kuvassa 25
on tehty. Tämä tuo esiin näyttöikkunan, josta nähdään laitoksen kaukolämpöverkkoon syöt-
tävän veden tärkeimpiä arvoja. Lukujen ja yksiköiden lisäksi on palkkikuvaus, josta näkee
suunnilleen kuinka paljon arvot voivat nousta tai laskea ennen kuin rajat tulevat vastaan.
Näytettävät arvot voivat sisältää muitakin lukuja, mutta käytettävyyden ja luettavuuden yl-
läpitämiseksi liiallista tietomäärää kannattaa välttää. Tarkemmat tiedot ovat kuitenkin näh-
tävissä laitoksen omasta käyttöliittymästä ja digitaalinen malli sisältää vain oleellista tietoa.
Verkon arvot on esitetty lyhentein, jotka esitellään seuraavaksi.



Kuva 25. Hukkalämpölaitoksen tiedot digitaalisessa kaksosessa.

Tfw (Temperature forward) lähtevä lämpötila kertoo lämmöntalteenottolaitoksen syöttämän kaukolämpöveden lämpötilan. Keltaisella viivalla palkin päällä on merkitty ohjelman tekoälyn suosittelema lämpötila. Kuvan tilanteessa malli ei ole vielä täysin valmis, mutta sen suosituksia voidaan helposti vertailla todelliseen tilanteeseen.

Trt (Temperature return) kaukolämmön paluulämpötila.

F (Flow) kaukolämmön virtausmäärä.

HF (Heat Flow) laitoksen tuottama kaukolämpöteho.

pfw (pressure forward) menoputken paine.

prt (pressure return) paluuputken paine.

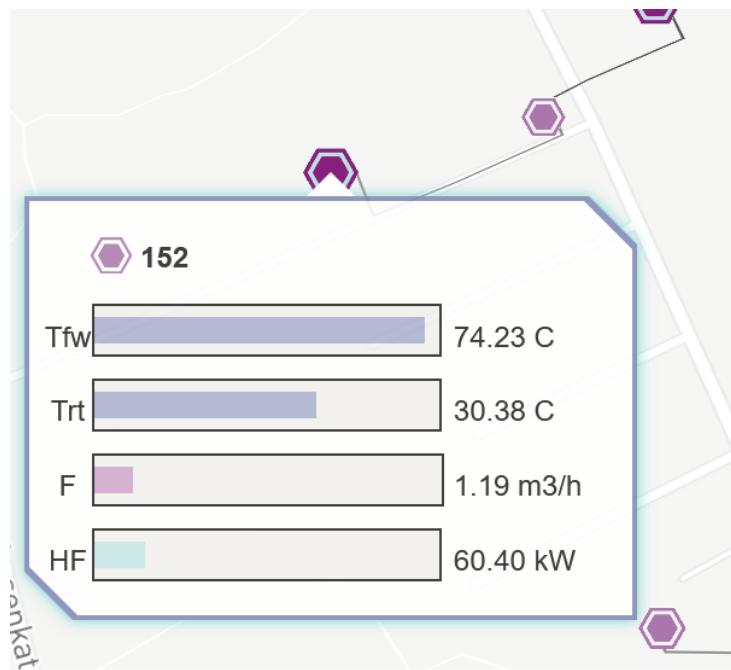
dp (delta pressure) paine-ero meno ja paluuputkessa.

Tuotantolaitoksien määrän lisääntyessä nopean verkon- ja laitosten tilan hahmottaminen on tehty ohjelmistossa helpoksi ja nopeaksi. Lämpökartta kiinnittää visuaalisesti huomion

poikkeaviin verkon arvoihin ja yhdellä klikkauksella saadaan asiakkaan tai tuotantolaitoksen perustiedot selville ja poikkeamiin päästään puuttumaan nopeasti.

5.4 Asiakaskohtaiset tiedot

Mittareiden päivitysten ja vaihtojen edetessä reaaliaikaisesti etäluettaviin mittareihin, parane mallin tarkkuus kulutuksen osalta ja näin ollen tuotantoa voidaan säätää tarkemmin ja verkon energiategokkuutta parantaa. Kuvassa 26 on esitetty erään uuden mittarin saaneen kohteen tietoja. Ylhäältä lukien nähdään asiakkaalle menevän veden lämpötila T_{fw} , palaavan veden lämpötila T_{rt} , virtaus F ja lämpöteho HF . Yhdistämällä LeanHeat-järjestelmän asiakaskohtaisia kulutusennusteita digitaaliseen kaksoseseen, voidaan tuleviin kulutuspiikkeihin ennakoida optimaalisilla ratkaisuilla. Riippuen kulutuspiikkien koosta, voidaan pienemmissä käyttää verkon varastointikykyä hyödyksi ja nostaa tietyn verkonosan lämpötilaa, varata lämpöä asiakkaan rakennuksen massaan tai suuremmissa piikeissä näiden lisäksi vielä täyttää lämpöakkuja ennakkoon.



Kuva 26. Asiakkaan tiedot digitaalisessa kaksosessa.

5.5 Tuotannon optimointi

Digitaalinen kaksonen voi ehdottaa eri tuotantolaitoksille tuotantotehoa tai ohjata laitoksia suoraan keräämänsä tiedon perusteella. Kuvassa 27 esitetään tämänhetkistä kaukolämmön tuotantoa kahdella palkilla. Ylempi Actual palkki sisältää kahden käytössä olevan tuotantolaitoksen tuotannot ja Optimal palkki näyttää näiden laitosten optimoidun tuotantotehon kyseiselle hetkelle. Kuvanottohetkellä käytössä olivat kiinteän polttoaineen tuotantolaitos (CHP) ja hukkalämmöntalteenottolaitos (WHP). Poissa käytöstä olivat 8 MW ja 5 MW kaasukattilat (LPG8 ja LPG5). Optimointijärjestelmä oli tässä vasta testivaiheessa, joten sen ei annettu ohjata järjestelmää vaan sen suosittellemaa tehoa pidettiin rinnalla vertailua varten. Alla olevasta violetista graafista nähdään vuorokauden ajalta toteutunut tuotanto eri laitoksilla. Värivalinnoissa on vielä hienosäädettävää, koska hukkalämmöntalteenottolaitoksen tuotantokäyrä on erittäin vaikeasti havaittavissa violetin keskeltä. Sinisellä käyrällä nähdään järjestelmän laskema optimituotanto kyseiselle aikavälille. Käyrien aikavälejä on helppo muuttaa liukusäätimillä.



Kuva 27. Tuotannon optimoinnin yksinkertaistettu näkymä.

Tarkkaa tuotannon optimointia varten tarvitaan reaaliaikaiset tiedot kaikista tuotantolaitoksista ja kuluttajista. Kuvanottohetkellä kulutuskohteista vasta noin 60 kpl oli mittauksessa, mutta kaikki noin 420 asiakasta on tarkoitus saada reaaliaikaiseen mittaukseen vuoden 2024 alkupuoliskolla. Mallin tarkkuus riippuu siihen syötettyjen lähtötietojen tarkkuudesta, joita ovat muun muassa putkien pituudet, putkihalkaisijat, putkien korkeusasemat, mutkat ja

kurvit, liittimet, haarat, venttiilit, paineenkorotusasemat, suunnitellut virtausnopeudet ja tehot sekä lämmöntuotantolaitteiden sijainnit verkossa.

5.5.1 Tuotannon lämpötilaoptimointi

Lämpötilojen optimointia varten on saatavissa laitoskohtaiset tuotantotiedot ja ennusteet kuten seuraavassa kuvassa 28 on esitetty. Siinä näkyy hukkalämmöntalteenottolaitoksen (WHP) sekä kiinteän polttoaineen tuotantolaitoksen ja kaasukattiloiden (CHP LPG) kaukolämpöverkkoon lähtävä lämpötila sekä paluulämpötila. Ylhäällä on valittuna aikaväliksi (Time Scale) yksi päivä ja vasemmalla voi vetovalikosta valita haluamansa tuotantolaitokset. Violetti viiva näyttää mitatut lämpötilat ja sinisellä näkyy digitaalisen kaksosen optimoima lämpötila. Sininen salmiakki osoittaa tämänhetkisen optimilämpötilan ja sininen katkoviiva kertoo ennusteen tulevalle optimituotannolle. Koska digitaalisen kaksosen ennusteet olivat vasta testivaiheessa, on niiden ja toteutuneen välillä eroa. Järjestelmästä puuttui vielä tässä vaiheessa valtaosa kulutuksen mittauksista ja se oli melko alkuvaiheessa. Tämän takia graafi sahaa edestakaisin melko rajusti.



Kuva 28. Lämpötilojen optimointi.

5.5.2 Kaukolämpöverkon virtauksen optimointi

Virtausta säätämällä voidaan säästää pumppauskustannuksissa ja vähentää energianhukkaa. Kaavan yksi mukaan voidaan pumppaustehoa pienentää pienentämällä tilavuusvirtaa tai vastaavasti vähentää putkiston aiheuttamaa paine-eroa. Paine-eron vähentäminen vaatii suurempien putkien asentamista. Tuotannon lämpötilaoptimoinnin tapaan kuvan 29 graafeissa on esitetty hukkalämmöntalteenottolaitoksen sekä kiinteän polttoaineen tuotantolaitoksen ja kaasukattiloiden tiedot. Digitaalisesta kaksosesta nähdään mitattu teho megawatteina sekä alemmissa kuvaajissa olevat todelliset virtaustiedot ja sinisellä olevat optimoidut tiedot. Jälleen lähtötietojen puutteellisuuden vuoksi optimigraafi sahaa rajusti edestakaisin. Kun järjestelmän kaikki osat on saatu mittaukseen ja tiedot siirtyvät reaaliajassa Gradyentille, voidaan odottaa optimointien ja ennusteiden olevan tuotantokäyttöön sopivia.



Kuva 29. Virtauksen optimointi.

5.6 Muita ominaisuuksia

Gradyent myy erilaisia lisäominaisuuksia digitaaliseen kaksoseseen. Näitä ohjelmistopaketteja liitetään malliin, jolloin verkostossa oleville erikoisjärjestelmille kuten lämpövarastoille saadaan tarkkoja ennuste- ja ohjausalgoritmeja. Vatajankoski Oy:n verkkoon ollaan hankkimassa vuoden 2024 alkupuolella lämpövarastokapasiteetin optimointiin tarkoitettu ohjelmistopaketti, jolla pyritään tehostamaan ja optimoimaan varastokapasiteetin purkua ja

latausta. Simulate and design-paketilla pystyy tekemään kevyitä suunnitelmia putkikoon muutosten vaikutuksista ja virtausmuutosten vaikutuksesta verkon toimintaan.

Alun perin ohjelmasta toivottiin kokonaisvaltaista ratkaisua kaukolämpöverkon muutosten simulointiin ja optimaalisten ratkaisujen löytämiseen esimerkiksi uusien lämmöntuotantolaitteiden sijoitusta varten. Hieman yllättäen projektin edetessä kuitenkin paljastui, että tämäntyyppinen verkon arvojen muutosten simulointi sekä verkon fyysisten muutosten vaikutusten simulointi ei käyttäjältä onnistu. Gradyent tarjoaa palvelua, jossa he toteuttavat simuloinnin annettujen arvojen perusteella. Näin ollen esimerkiksi uuden kattilan lisääminen verkkoon vaatii tarkat laskelmat, putkistomitoitukset ja laitteiston sijainnin valinnan ennen tietojen lähettämistä Gradyentille. Simuloinnit kuuluvat Vatajankoski Oy:n sopimukseen, eikä niistä tarvitse maksaa lisähintaa. Toivottu ominaisuus, jossa käyttäjä saisi kokeilla eri sijoituspaikkoja tuotantolaitokselle, vaihdella sen tehoja sekä putkikokoja ja pumppaustehoja puuttuu toistaiseksi. Tällä olisi päästy tarkemman näkemään mahdollisten pullonkaulojen syntyminen muualle verkkoon ja päästy monipuolisesti optimoimaan verkon rakennetta jo ennen sen lopullista suunnittelua. Vatajankoski Oy teetti uuden sähkökattilan simuloinnit suunnitelmien perusteella Gradyentilla ja niillä saatiin vahvistus suunnitelmien toimivuudelle ja toteutettavuudelle. Samalla saatiin mitoitustietoja tarvittavalle välipumppaamolle, saatiin arviot käyttötunneista ja pumppauskustannuksista. Tämä toi tukea investointipäätöksen tekemiseen. Tulevaisuudessa Gradyentilta on tulossa Simulate and design paketti. Sillä pystyy tekemään samat suunnitelmat ja laskelmat, jotka nyt pitää tilata. Paketti on muuten valmis, mutta siitä puuttuu selkeä käyttöliittymä, jolla käyttäjä voi laskelmat tehdä.

6 Johtopäätökset

Työssä esiteltiin Vatajankoski Oy:lle hankittua Gradyentin digitaalista kaksosta, sekä selvitettiin sen käyttökohteita ja mahdollisuuksia. Digitaaliset kaksoset tuovat merkittäviä hyötyjä kaukolämpöverkon jokapäiväiseen käyttöön. Esimerkkeinä nopea yleistilanteen hahmottaminen lämpökartoilla, aikajanalla liikkuminen, jolloin historiatietoja saadaan näkyviin sekä ennustekäyrät, joilla saadaan tuotannon taloudellisuutta lisättyä.

Kaukolämpöverkon kehittäminen ohjelmistolla ei lopulta ollut niin monipuolista, kun projektin alkuvaiheessa oli uskomus. Aloitin tekemään tutkimusta, kun ohjelmiston hankinta oli jo päätetty ja Gradyent oli alkanut tekemään mallia kaukolämpöverkosta. Tässä vaiheessa työni tarkoitus oli mallin valmistuttua tehdä sillä erilaisia simulointeja, joilla voitaisiin tehostaa lämpövarastojen käyttöä, alentaa verkoston lämpötilaa ja etsiä parhaita paikkoja uusien lämmöntuotantolaitteiden lisäämiseksi. Mallin ensimmäisen kokeiluversion tullessa paljastui, että tällaista simulointimahdollisuutta ei käyttäjällä vielä ole, vaan ne voi toteuttaa vain Gradyent maksusta. Tämä johtuu siitä, ettei Gradyentillä ole vielä valmiina käyttöliittymää, jolla asiakas voisi simuloinnit tehdä. Ominaisuus on tulossa myöhemmin. Tämä vaikutti tulevan yllätyksenä myös tilaajan puolelta mukana olleille.

Jatkossa tilaajan tulee tuoda omat näkemykset ja ideat ohjelmiston tai järjestelmän käytöstä esille jo ennen sopimusten tekoa, jotta toimittaja voi kertoa vastaako tuote näihin toiveisiin. Etenkin ohjelmistohankinnoissa suurimpia syitä epäonnistumiseen ovat viestintäongelmat järjestelmän tilaajan ja toimittajan välillä. Usein myös aikataulu pettää, kuten tässäkin tapauksessa digitaalisen kaksosen ensimmäinen verkkomalli myöhästyi hieman yli puoli vuotta. Ongelmia oli lähinnä eri järjestelmien tiedonsiirron yhtenäistämässä ja siinä, että tiedonsiirto ei vaaranna kriittisten järjestelmien tietoturvaa. Näiden ohjelmiston ominaisuuksien ja aikatauluviivytysten vuoksi muutettiin työtäni enemmän järjestelmää esittelevämpään suuntaan.

Gradyentin digitaalista kaksosta on alettu ottamaan käyttöön ensimmäisenä Helenin verkossa vuonna 2021 eikä järjestelmä ole vielä valmis. Työtä hidastaa verkon massiivinen koko ja asiakkaiden suuri määrä. Tällä hetkellä Vatajankoski Oy:n digitaalinen kaksonen on pisimmällä Suomessa. Pääosa jäljellä olevasta työstä liittyy asiakkaiden reaaliaikaisten

mittareiden vaihtoon ja niiden tiedonkeruuseen, sekä muutamiin automaatiomuutoksiin, jotta kaikki järjestelmät saadaan digitaalisen kaksosen ohjattavaksi.

Vaikka projekti on vielä kesken, on digitaalinen kaksonen jo tuonut hyötyjä kaukolämpöverkon kehittämiseen. Sillä on paikallistettu verkossa muutamia pullonkauloja, näitä korjataan lähitulevaisuudessa suuremmilla putkilinjoilla. Sen historiatoimintoja ja kattavia esitystapoja on hyödynnetty poikkeuksellisen vikatilanteen seurausten selvittelyssä. Vaikka vikatilanne näytti valvomossa pahalta sen tapahtumisaikaan, saatiin digitaalisen kaksosen historiatiedoista selville, että lämmönkäyttäjille ei kuitenkaan koitunut juurikaan häiriötä. Monista pienemmistä verkoston korjauksista ja asiakkaiden muutostöistä on teetetty Gradyentilla simulointeja, joiden tuloksena putkikokoja ja virtauksia on saatu optimoituja paremmin. Simuloinneista on ollut apua suunniteltaessa uuden paljon matalaa lämpöä käyttävän asiakkaan liittytää, jossa simulointien perusteella päädyttiin hyödyntämään pääosin verkoston paluulämpötilaa.

Digitaalisen kaksosen suurimpana heikkoutena havaittiin inhimillisten virheiden aiheuttamat poikkeavuudet sen ennusteiden toiminnalle. Mallia rakennettaessa saattaa tietoja syötettäessä tulla virheitä joko tietojen antajalle tai tietojen syöttäjälle. Lisäksi saattaa tulla väärintymmärryksiä siitä, kuinka jotkin järjestelmät toimivat. Nämä virheet mallissa aiheuttavat välillä hankalasti selvitettäviä virheitä myös simulaatioissa ja ennusteissa. Mitä suurempi verkosto malliin rakennetaan ja mitä enemmän on erilaisia energiantuotantomuotoja, sitä tärkeämpään rooliin nousee mallin testikäyttö ja vertailu todelliseen dataan. Edellä mainitut asiat tekevät käyttöönotosta jopa vuosia kestävä projektin.

Verrattain pienessä kaukolämpöverkossa digitaalinen kaksonen on tuonut paljon hyötyjä, joten voidaan olettaa, että suurissa verkoissa hyödyt ja säästöt energiassa ja rahassa ovat monta kertaa suuremmat. Tätä tukevat Helenin kommentit järjestelmän käytöstä. Uudet alemmat K1/2021 mukaiset kaukolämpöjärjestelmien suunnittelulämpötilat tulevat monipuolistamaan lämmöntalteenoton mahdollisuuksia ja parantamaan energiatehokkuutta. Siirtymävuodet siihen, että kaikki järjestelmät on saatu vaihdettua alemmaa lämpötilaa hyödynnettäviksi vaativat hyvää verkon ja tuotannon hallintaa. Tähän digitaalinen kaksonen tarjoaa ratkaisun.

Lähteet

- Digital Directions. 2022. 4 Types of Digital Twins (Basic Overview with Examples) [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.4.2023]. Saatavissa: <https://digitaldirections.com/4-types-of-digital-twins-basic-overview-with-examples/>
- Ding, Y. 2021. Thermal Energy Storage - Materials, Devices, Systems and Applications - 1.1 Basic Concepts of Thermodynamics. Royal Society of Chemistry (RSC). [Viitattu 18.3.2023]. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012VOC07/thermal-energy-storage/basic-concepts-thermodynamics>
- Energiateollisuus ry. 2011. Kaukolämpöverkon pumppausjärjestelyt. Suositus L10/2011.[verkkoaineisto] [viitattu 13.3.2023] Saatavissa: https://energia.fi/files/673/SuositusL10_2011_Pumppaus.pdf
- Energiateollisuus ry. 2018. Kaukolämpötilasto 2017. ET-Kaukolämpökansio 7/1. ISSN 0786-4809
- Energiateollisuus ry. 2020. Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.1.2023]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>
- Energiateollisuus ry. 2022. Kaukolämpö 2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 9.1.2023]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo_2021_v2.pdf
- Energiateollisuus ry. 2022b. Kaukolämmön tuotanto, kulutus, tuotantokapasiteetti sekä polttoaineet alueittain v. 2021. Taulukko 4. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.1.2023]. Saatavissa: https://energia.fi/files/7478/KL_Aluellinen_2021.xlsx
- Energiateollisuus ry. 2023. Energiavuosi 2022 Kaukolämpö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.1.2023]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2022.pdf
- Finder. 2022. Vatajankoski Oy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.12.2022]. Saatavissa: <https://www.finder.fi/S%C3%A4hk%C3%B6sopimus/Vatajankoski+Oy/Kaanaap%C3%A4%C3%A4/yhteystiedot/183844>

Fingrid.fi 2021. Varavoimalaitokset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.2.2023]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/maankaytto-ja-ymparisto/periaatteet-ja-toimintatavat/varavoimalaitokset/>

Gradyent.ai. 2022. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2022]. Saatavissa: <https://www.gradyent.ai/>

Gokhale, P., Bhat, O., Bhat, S. 2018. Introduction to IOT. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. [E-Kirja]. [Viitattu 2.5.2023]. DOI: 10.17148/IARJSET.2018.517

Helenventures.fi. 2022. €10 million for Dutch climate scale-up Gradyent to make district heating systems more efficient and sustainable. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.12.2022]. Saatavissa: <https://www.helenventures.fi/stories/10-million-for-dutch-climate-scale-up-gradyent-to-make-district-heating-systems-more-efficient-and-sustainable>

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Helsinki. Opetushallitus. ISBN 978-952-13-3476-4

Huovilainen, N., 2018. Vuosaaren B-voimalaitoksen prosessin analysointi ja teknistaloudelliset kehittämismahdollisuudet. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. [Viitattu 19.2.2023]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201901021012>

Hurttila, E. 2022. Hiekkalämpövaraston tekniikka ja käyttö. Vatajankoski Oy:n Kankaanpään hiekkalämpövarasto projekti. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. [Viitattu 20.12.2022]. Saatavissa : <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022061317811>

Hölttä, L. 25.3.2021a. Flue gas scrubber PID piirros. 2018. Henkilökohtainen tiedonanto.

Hölttä, L. 25.3.2021b. Hukkalämpölaitoksen toimintaselostus. 2020. Henkilökohtainen tiedonanto.

Jalovaara, J. Aho, J. Hietamäki, E. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen Ympäristökeskus. ISBN 952-11-1489-4

Koskelainen, L. Saarela, R. Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry. ISBN 952-5615-08-1

Motawa, I. Almarshad, A. 2013. A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction*. 29. 173–182. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.10.2023]. DOI:10.1016/j.autcon.2012.09.008.

Mäkelä Velimatti & Jarmo Tuunanen. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 05.03.2023] Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-588-506-7>

Niemi, A. 2021. Vatajankoski Oy:n Kiinteänpolttoaineen näytteenoton parantaminen. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Insinööriyö. [Viitattu 15.12.2022]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202104064224>

Nordic BIM. 2022. Mikä rakennuksen digitaalinen kaksonen oikeasti on? [Verkkosivu]. [Viitattu 25.1.2023]. Saatavissa <https://www.nordicbim.com/fi/bimblogi/mik%C3%A4-rakennuksen-digitaalinen-kaksonen-oikeasti-on>

Piira, K. 2023. Sellon energiankulutuksen ja paikallisen tuotannon ennustemallit. SPARCS-webinaari. Virtuaalivoimalaitos osana kiinteistöjen tulevaisuutta. 19.4.2023.

Polar Night Energy. 2022. Technology. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.12.2022]. Saatavissa: <https://polarnightenergy.fi/technology>

Porienergia.fi. 2022. Porilaisen kaukolämmön alkuperä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 26.02.2023]. Saatavissa: <https://www.porienergia.fi/lampo/tietoa-kaukolammosta/ymparisto--alkupera>

Rathore, M., Shah, S., Shukla, D. 2021. Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. [E-kirja]. [Viitattu 2.5.2023]. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3060863

Redshift. 2022. What Is a Digital Twin? How Intelligent Data Models Can Shape the Built World. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.4.2023]. Saatavissa: <https://redshift.autodesk.com/articles/what-is-a-digital-twin>

Tekla. 2022. Mitä on BIM? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.4.2023]. Saatavissa: <https://www.tekla.com/fi/ajankohtaista/artikkelit/mit%C3%A4-on-bim>

Tributech. 2019. Digital Twins: The 4 types and their characteristics. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.4.2023]. Saatavissa: <https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins>

Trimble NIS. 2021. Trimble NIS. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.4.2023]. Saatavissa: <https://upa.trimble.com/fi-fi/tuotteet/trimble-nis-vesihuolto>

Trimble SiteVision. 2021. Trimble SiteVision. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 11.4.2023]. Saatavissa: <https://upa.trimble.com/fi-fi/tuotteet/sitevision-verkkoyhtiaille>

Valtioneuvosto. 2022. Asetus turvetuotantokoneiden romutustuesta voimaan. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.2.2023]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/asetus-turvetuotantokoneiden-romutustuesta-voimaan>

Vatajankoski.fi. 2021. Kaukolämpöverkostomme kartalla. [Verkkosivu]. [Viitattu 2.04.2023]. Saatavissa: https://www.vatajankoski.fi/wp-content/uploads/kaukolampo-verkko-31.3.2021_web2.jpg

Vatajankoski.fi. 2022. Vatajankoski tekee rakennuksista ekologisempia palvelinten avulla. [Verkkosivu]. [Viitattu 30.12.2022]. Saatavissa: <https://www.vatajankoski.fi/pilottihankkeen-tulos-vatajankoski-kehitti-keinon-lammittaa-uimahallia-tai-kauppakeskusta-ekologisesti/>

Vatajankoski.fi. 2022. Vatajankoski yrityksenä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.12.2022]. Saatavissa: <https://www.vatajankoski.fi/tietoa-vatajankoskesta/>

Vatajankoski.fi. 2023. Tilinpäätös ja toimintakertomus. Vatajankoski-konserni. Tilikausi 1.1.-31.12.2022 [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.04.2023]. Saatavissa: https://www.vatajankoski.fi/wp-content/uploads/vso_tilinpaaatos_2022.pdf

Wärtsilä.com. 2016. Wärtsilä toimittaa 310 MW:n voimalan Bangladeshiin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2023]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/02-06-2016-wartsila-toimittaa-310-mwn-voimalan-bangladeshiin>

Wärtsilä.com. 2023. Technical comparisons: Combustion engines and gas turbines. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2023]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/energy/learn-more/technical-comparisons/combined-cycle-plant-for-power-generation-introduction>