



Sami Pusa

# Digitaalisen kaksosen mahdollisuudet kaukolämpöverkon optimoinnissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

19.5.2021

# Tiivistelmä

Tekijä:	Sami Pusa
Otsikko:	Digitaalisen kaksosen mahdollisuudet kaukolämpöverkon optimoinnissa
Sivumäärä:	38 sivua
Aika:	19.5.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Ympäristötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Juha Kotamies, Metropolia Ammattikorkeakoulu Kehityspäällikkö Petri Penttinen, Vantaan Energia

---

Tässä insinöörityössä tarkastellaan digitaalisten kaksosten mahdollisuuksia kaukolämpöverkon optimoinnissa ja kulutuksen mallintamisessa. Digitaalisella kaksosella tarkoitetaan fyysisen järjestelmän digitaalista versiota, jolla pystytään simuloimaan järjestelmän toimintaa tai muutoksia. Työn tilaaja on Vantaan Energia, ja opinnäytetyö on yksi DigiSalama-hankkeen projekteista. Työn tarkoituksena on kartoittaa digitaalisten kaksosten ominaisuuksia ja vaatimuksia.

Aluksi työssä kuvataan kaukolämpöverkon toiminnallisuutta sekä Vantaan Energian kaukolämpöverkkoa. Tämän lisäksi tarkastellaan rakennuksien fyysisiä ominaisuuksia energiankulutuksen ja energiatehokkuuden näkökulmasta. Tämän jälkeen työssä esitellään digitaalisten kaksosen käyttösovelluksia ja erilaisia ohjelmistoja, joilla voidaan tämäntyyppistä verkon mallintamista toteuttaa. Osiossa myös tarkastellaan digitaalisen kaksosen validointiin, haasteisiin ja epätarkkuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

Taustamateriaalin jälkeen työssä esitellään case-esimerkkinä Luulajan kaukolämpöverkon digitaalista kaksosta. Lopuksi tarkastellaan Vantaan Energian kaukolämpöverkon näkökulmasta digitaalisen kaksosen tuomia hyötyjä sekä pohditaan, mitä sellaisia tietoja yhtiöllä on saatavilla, joiden pohjalta pystyisi luomaan digitaalisen kaksosen.

Digitaalinen kaksonen tarjoaa kaukolämpöverkon optimointiin paljon uusia työkaluja. Se tarjoaa esimerkiksi mahdollisuuden ennustaa tulevaa kulutusta tai mallintaa uusia verkon osia etukäteen. Suuren verkon mallintaminen on kuitenkin monimutkainen prosessi, joka vaatii laajasti lähtö- ja historiatietoja rakennuksista, lämmöntuotantolaitoksista sekä kaukolämpöverkosta.

Avainsanat:	Vantaan Energia, DigiSalama-hanke, kaukolämpö, digitaalinen kaksonen, rakennuksen energiankulutus, simulointi, mallintaminen
-------------	--

## Abstract

Author:	Sami Pusa
Title:	Opportunities for a Digital Twin in Optimizing District Heating Network
Number of Pages:	38 pages
Date:	19 May 2021
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Energy and Environmental Engineering
Professional Major:	Environmental Engineering
Instructors:	Juha Kotamies, Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences Petri Penttinen, Development Manager, Vantaan Energia Oy

---

This thesis studies the opportunities of digital twins in consumption modelling and optimizing the district heating network. The Digital twin is a digital presentation of the physical system. It can be used to simulate system changes or activities. The thesis is done for Vantaa Energy and it is one of DigiSalama-projects. The Purpose of this work is to observe opportunities and requirements of digital twins.

The first part of the thesis describes Vantaa Energia Oy and district heating generally. Also physical properties of buildings are observed from the point of view of energy efficiency and energy consumption. Next different Installations and platforms which can be used for building a digital twin from large systems like district heating are described. In addition, validation, challenges and inaccuracy factors are also studied.

After the background material, a case example of Luleå's digital twin in district heating. The thesis ends with a reflection about a benefits and challenges of building digital twin from the point of view of Vantaa Energy. In addition, is also reviewed what kind of information is already available which can be used for a digital twin.

A digital twin offers a large number of new tools for optimizing district heating networks. For example it provides a possibility to forecast future demands or simulate new parts of the grid before construction. In any case, simulating a large system is a complex project, and it will need a large amount of historical and input data from buildings, production units and the district heating network.

Keywords: Vantaan Energia Oy, DigiSalama, district heating, digital twin, building energy consumption, simulation, modelling

# Sisällys

## Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	Kaukolämpö	2
2.1	Vantaan Energia	2
2.2	Yleistä	3
2.3	Vantaan kaukolämpöverkko	6
3	Rakennuksen energiatehokkuus	9
3.1	Energiatehokkuus	9
3.1.1	Energiatehokkuuslaskennan periaatteet	10
3.1.2	Lämpöhäviöt	12
3.1.3	Lämmitysjärjestelmän energiankulutus	13
3.1.4	Lämpökuormat	13
3.1.5	Käyttövesi	14
3.2	Taloautomaatio	15
3.3	Lämpövarasto	16
4	Digitaalinen kaksonen	17
4.1	Käyttökohteet	17
4.2	Teknologia	18
4.3	Validointi	20
4.4	Haasteet	22
4.5	Ohjelmistoesimerkki IES ICL	23
5	Case Luulaja	25
5.1	Rakennuksien energiankulutuksen mallintaminen	26
5.1.1	Black box	26
5.1.2	Grey box	26
5.2	Verkon mallintaminen	28
5.3	Saavutukset	30
5.3.1	Sisälämpötilan alentamisen simulointi	31
5.3.2	Kulutushuippujen tasaaminen	32
5.3.3	Energiamäärän alentaminen	33

5.3.4	Järjestelmän ohjaus	34
6	Päätelmät	34
6.1	Mallin luominen	35
6.2	Käyttödatan kerääminen	36
6.3	Hyödyt	38
7	Yhteenveto	38
	Lähteet	40

## Lyhenteet ja käsitteet

Black-box Tietoperusteinen mallintamismenetelmä.

CHP Compined Heat and Power. Kaukolämmön ja sähkön yhteistuotantolaitos.

FMI Functional Mockup Interface. Mallinnus ja simulointi -standardi.

GIS Geographical Information System. Paikkatietojärjestelmä.

Grey-box Mallintamismenetelmä, jossa käytetään hyväksi järjestelmästä saatavaa syötettä.

HOB Heat Only Boiler. Lämpölaitos.

MATLAB Numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto ja ohjelmointikieli.

Modelica Tuotemallintamisessa käytettävä ohjelmointikieli.

OPTi-Sim Optimization of District heating & cooling systems. Luulajan kaukolämpöverkon optimointi ja simulointi -projekti

Trimble NIS Kaukolämpöverkon mallinnus ja simulointi -työkalu.

Validointi Prosessi, jossa tarkistetaan, kuinka digitaalinen kaksonen mukailee fyysistä versiota.

## 1 Johdanto

Insinööriyön lähtökohtana on Vantaan Energian tarve luoda järjestelmä, joka määrittäisi kaukolämpöverkon lämpötilatarpeen. Tällä hetkellä yhtiöllä on lämpöverkon ohjauksessa käytössä ulkolämpötilaan perustuvat ohjauskäyrä sekä kokemukseen ja ammattitaitoon perustuva pääoperaattorin vakiintunut käytäntö ohjata kaukolämpöverkkoa.

Digitalisaation ja koneoppimisen yleistyessä on kehittynyt tuotemallintamisen metodi digitaalinen kaksonen, joka on digitaalinen versio fyysisestä järjestelmästä. Digitaaliset kaksoset ovat yleistyneet muun muassa tuotantoprosessien mallintamisessa ja testauksessa sekä rakennuksien automaatiassa. Teknologioiden kehittyessä on siirrytty luomaan laajoista monimutkaisista kokonaisuuksista digitaalinen kaksonen. Tällainen on esimerkiksi luotu Singaporen kaupungista.

Tämä insinööriyö on selvitys digitaalisen kaksosen soveltamisesta kaukolämpöverkon dynaamiseen mallintamiseen. Työssä käsitellään yleisesti kaukolämpöverkon toimintaa, rakennuksien energiankäytön kohteita sekä digitaalisia kaksosia kaukolämpöverkkojen näkökulmasta. Lisäksi käsitellään Luleå Energi Ab:n ja Luulajan yliopiston projektia, jossa luotiin Luulajan kaukolämpöverkosta digitaalinen kaksonen. Viimeisenä on pohdintaa digitaalisen kaksosen hyödyistä Vantaan Energian näkökulmasta sekä tällaisten järjestelmien luomisen haasteista.

Työ on kirjallisuuskatsaus, jonka on tarkoitus toimia Vantaan Energialla pohjatietona digitaalisen kaksosen hyödyistä ja edellytyksistä. Työssä ei anneta tarkkoja laskelmia mahdollisista taloudellisista tai muista energian säästön hyödyistä.

## 2 Kaukolämpö

Tässä luvussa esitellään kaukolämpöverkkojen ja tuotannon yleisiä periaatteita sekä Vantaan Energian kaukolämpöverkkoa. Lisäksi esitetään Vantaan Energia Oy:n tunnuslukuja. Suomessa on 166:ssa kunnassa kaukolämpöverkko, ja se on suosituin lämmitysenergiamuoto. Vuonna 2012 46 % lämmitysenergiasta toteutettiin kaukolämpönä. Kaukolämpö tuotetaan yhteistuotantolaitoksissa, Combined Heat and Power (CHP), joissa sähköntuotannossa syntyvä hukkalämpö hyödynnetään kaukolämpönä tai erillisissä kaukolämpölaitoksissa. [1]

### 2.1 Vantaan Energia

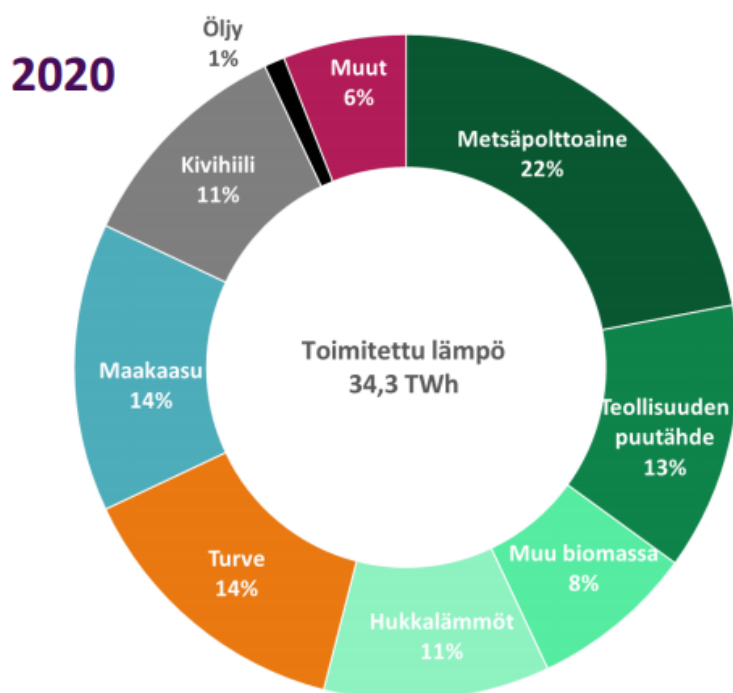
Vantaan Energia -konserni muodostuu Vantaan Energia Oy emoyhtiöstä, tytäryhtiö Vantaan Energia Sähköverkot Oy:sta sekä osakkuusyhtiöistä. Vantaan Energia Oy on perustettu vuonna 1919, ja sen omistaa Vantaan kaupunki sekä Helsingin kaupunki. Vantaan kaupungilla on enemmistöomistus 60 %. Yhtiö tuottaa pääasiallisesti asiakkailleen sähköä ja lämpöä. Sähkön toimitusalue on Suomi ja lämmön toimittamisen pääalue on Vantaa. Yhtiöllä on osuuksia seuraavissa yhtiöissä: Suomen Hyötytuuli Oy, EPV Energia Oy, Pohjolan Voima Oy, Voimaosakeyhtiö SF ja Innopower Oy. Vantaan Energian tavoitteena on luopua kivihiilen käytöstä vuoteen 2026 mennessä. [2, s. 1.]

Vantaan Energian sähkön ja lämmön tuotantolaitokset ovat Martinlaakson CHP-voimalaitos sekä Långmossebergenin CHP-voimalaitos, jonka polttoaineena on yhdyskuntajäte. Näiden lisäksi kaukolämpöä tuotetaan erillisissä lämpövoimaloissa. Martinlaaksossa tuotettiin vuonna 2019 sähköä 290 gigawattituntia (GWh) ja lämpöä 903 GWh. Jätteenpolttolaitoksessa sähköä tuotettiin 201 GWh ja kaukolämpöä 918 GWh. Jätettä poltettiin 376 150 tonnia. Kokonaisuudessaan vuonna 2019 yhtiö tuotti sähköä 1 303 GWh. [2, s. 1–2.]



## 2.2 Yleistä

Kaukolämmön tuotannossa hukkalämmön osuus on ollut vuosittain nousussa, ja vuonna 2020 uusitutuvien energiamuotojen sekä hukkalämmön osuus kaukolämmön tuotannosta oli 54 %, josta hukkalämmön osuus oli 11 %. Kokonaisuudessaan kaukolämmön energiamäärä oli 34,3 terawattituntia (TWh). [3] Kuvassa 1 on esitetty polttoaineiden jakautuminen polttoainemateriaalin mukaan.



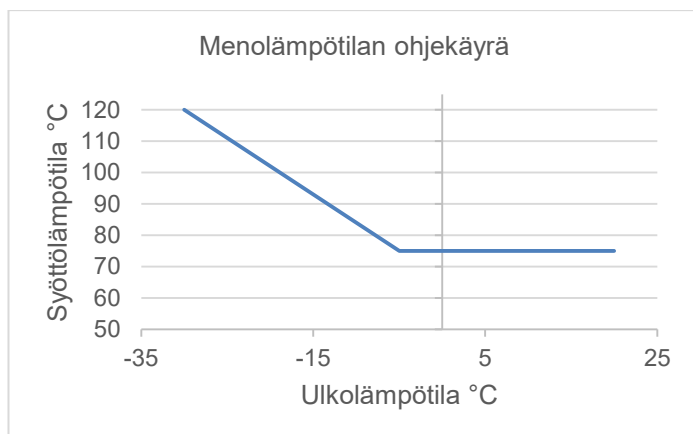
Kuva 1. Kaukolämmön tuotantomuodot [3].

Kaukolämpö toimitetaan kiinteistöille kaksiputkisessa verkossa. Menoputkessa syötetään lämmitettyä vettä, josta on poistettu happi sisäisen korroosion ehkäisemiseksi putkistossa. Kaukolämpöveden lämpötila on 65–115 °C riippuen vuodenajasta. Kesäkaudella kaukolämmitystä käytetään lähinnä kiinteistön käyttöveden lämmittämiseen. Kaukolämmön alin toimituslämpötila 65 °C perustuu talousveden laatuvaatimukseen. Lämpimän käyttöveden tulee olla vähintään 56 °C, jotta vältetään legionellabakteerin esiintyminen. Käyttöveden lämpötila ei myöskään saa ylittää 65 °C:ta kohonneen tapaturmariskin vuoksi.

Kiinteistöissä kaukolämpöputken lämpö siirretään lämmönjakohuoneessa lämmönvaihtimella talon lämpöverkkoon. Lämpöenergian siirto käyttäjälle tehdään lämmönvaihtimella kaukolämpöverkon korkean paineen ja tästä aiheutuvan tapaturma- ja vesivahinkoriskin vuoksi. Lämmönvaihtimen jälkeen kaukolämpö palaa kaukolämpöverkon paluulinjassa voimalaan. Paluulinjan lämpötila vaihtelee tyypillisesti välillä 25–50 °C. [4]

CHP-laitoksessa sähkö ja lämpö tuotetaan samassa prosessissa. Tällöin polttoaine saadaan hyödynnettyä korkealla hyötysuhteella. Tuotanto voi perustua moottorivoimalaitokseen, höyryprosessiin tai kaasuturbiiniprosessiin. Höyryprosessissa höyrykattila tuottama höyry ohjataan sähköä tuottavan höyryturbiinin lävitse ja tämän jälkeen kaukolämmön lämmönvaihtimille. Kaasuturbiinissa lämpöenergia kerätään suoraan savukaasuista tai erillisessä jätelämpökattilassa. Moottorivoimalaitoksessa sähköä tuotetaan generaattorilla, jonka tuottamasta lämmöstä ja pakokaasusta tuotetaan kaukolämpöä. [5, s. 24.]

Kaukolämmön tuotanto perustuu eritehoisten lämmöntuotantolaitosten optimaaliseen yhdistelmään. Verkkoa optimoidessa tavoitteena on ylläpitää verkon luotettavuutta sekä pitää tuotantokustannukset ja ympäristöhaitat mahdollisimman alhaisina. Optimointiin vaikuttaa muun muassa asiakkaiden lämmöntarve, verkoston siirtokapasiteetti, polttoaineiden hintasuhteet sekä ennustettu sähkön ja lämmön tarve. Tuotantolaitoksissa vaihtelee käytettävä polttoaine sekä tuotantokapasiteetti. Nämä edellä mainitut tekijät vaikuttavat tuotantolaitoksien käynnistys- ja sulkemisjärjestykseen lämmitystarpeen vaihdellessa. Kaukolämmön tuotantolaitoksissa tärkeimpiä säädettäviä tekijöitä ovat paine-ero meno- ja paluuputken välillä sekä verkoston syöttölämpötila. Paine-eroa säädetään tuotantolaitoksissa sekä erillisissä pumppaamoissa. Paine-eron tulee olla asiakkaalla vähintään 60 kilopascalina (kPa). Verkoston energiamäärää säädetään polttoaineen määrää säätämällä. Tähän vaikuttavat verkoston suunnittelulämpötila (Suomessa 120 °C), CHP-tuotannon vaatimukset, ulkoilman lämpötila ja lämpöhäviön minimointi. [5, s. 22.] Kuvassa 2 on esitetty esimerkki ulkolämpötilan vaikutuksesta syöttölämpötilaan.



Kuva 2. Menolämpötilan ohjekäyrä [5, s. 22].

Sen lisäksi että kaukolämmön painetta ja lämpöä säädetään laitoksella, säätö tapahtuu myös lämmöntuotantolaitoksien ajamisella tarpeen mukaan. Kesäkaudella lämmitystarve on noin 10 % talvikaudesta, jolloin käytetään pelkästään peruskuormalaitoksia. Peruskuormalaitoksiksi kutsutaan niitä, joissa on suurin kapasiteetti ja jotka tuottavat pääosan vuotuisesta energiantarpeesta. Suurissa kaukolämpöjärjestelmissä on useita lämmityslaitoksia samassa verkossa. Pienissä järjestelmissä lämpöä voi tuottaa yksittäinen lämpölaitos. Molemmissa järjestelmissä tarvitaan sekä huippu- että varatehoa. Parhaassa tilanteessa nämä laitokset sijaitsevat verkon kannalta optimaalisimmassa pisteessä. Todellisuudessa ne todennäköisimmin sijaitsevat siellä, mihin on saatu rakennuslupa. Huippulaitoksia ajettaessa kaikissa laitoksissa on sama pumppauspaine sekä lämpötilansyöttö. Tyypillisesti vain yhtä laitosta säädetään tarpeen mukaan ja muut toimivat vakiokuormituksessa. Tämä on normaalisti suurimman kapasiteetin laitos. CHP-laitos ei yleisesti toimi säätölaitoksena, sillä sen tulee huolehtia myös sähköntuotannon tarpeista. [5, s. 30–33.]

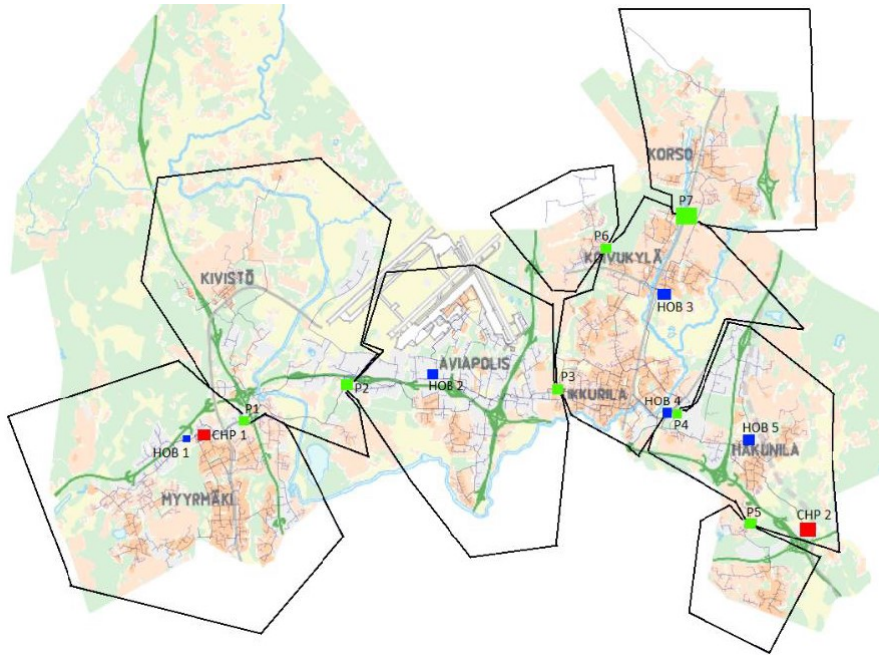
Kiinteistöissä kaukolämmön säätämisestä vastaa lämmönjakohuoneen laitteisto, joka siirtää lämpöä kiinteistön lämmitysjärjestelmään. Perinteinen yksikkösäätölaitteisto sisältää lämmityksen ja käyttöveden säätölaitteiston, joka ohjaa virtausta lämmönvaihtimessa ja lämmitysjärjestelmän vesikiertossa. Yksinkertainen säätölaitteisto säätää verkon lämpötilaa ulkolämpötilan perusteella. Rakennustekniikan kehittyessä lämmönjakokeskus on liitetty osaksi

rakennusautomaatiota, joilla on mahdollista säätää eri toimintoja rakennuksessa, sekä taata hyvä, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto energiatehokkaasti. Älykkäät järjestelmät saattavat säätää lämmönkiertoa useiden eri parametrien perusteella. [5, s. 79.]

Lämpöhäviöihin kuluu kaukolämpöverkossa verkon koosta riippuen huomattava osuus kaukolämmön tuotannosta. Kaukolämpöverkon putket aiheuttavat Suomessa 8–9 %:n lämpöhäviön, isojen kaupunkien verkoissa lämpöhäviö on noin 5–8 % ja pienissä lämpöverkoissa 10–15 % [6]. Yleisimpiä tekijöitä kaukolämpöverkon lämpöhäviöihin ovat: verkon liian korkea käyttölämpötila, puutteellinen tai vanhentunut lämmöneristys, putkiston vuotovedet, maaperän lämmönjohtavuus, huono peitteisyys, verkon matala käyttöaste, ylimitoitetut komponentit sekä mittausepä-tarkkuudet [7].

### 2.3 Vantaan kaukolämpöverkko

Vantaan Energialla on 577 kilometriä kaukolämpöverkkoa. Kuvassa 3 on esitetty kaukolämmön tuotantolaitokset sekä mustalla viivalla jaotellut pumppausalueet. Verkossa on kaksi CHP-voimalaa. CHP 1 on Myyrmäen yhteistuotantolaitos, jossa on biopolttoaine- ja hiilikattila. Laitoksen kaukolämpökapasiteetti on 335 MW. Lisäksi laitoksessa on varavoimana kaasuturbiini. CHP 2 on jätteenpolttolaitos, jossa on kaksi jätteenpolttouunia kytkettynä yhteen höyryturbiiniin. Laitoksen kaukolämpökapasiteetti on 147 MW. Molemmissa laitoksissa on lämpövarasto tasoittamaan lämmöntarpeen huippuja. Heat Only Boilers (HOB) eli lämpölaitokset ovat käytössä, kun CHP-laitokset ovat ajettu alas tai kun lämmöntarpeen kasvaa talvella lämpötilan laskiessa. Lämpölaitoksissa käytetään kaasua pääsääntöisenä polttoaineena ja öljyä varapolttoaineena. Pois lukien HOB 2, jossa käytetään pelkästään öljyä. Lämpölaitoksien yhteenlaskettu teho on 519 MW. P 1–7 ovat pumppauslaitoksia, joissa pumppauksen suunta riippuu käytössä olevien laitoksien mukaan. Pumppaamot ylläpitävät verkon painetta yhteistyössä tuotantolaitoksien kanssa. Vantaan lämpöverkon lämpöhäviö on noin 6–7 %. [8; 9; 10]



Kuva 3. Vantaan kaukolämmön tuotantolaitokset ja pumppausrajat [9, s. 6].

Vantaan Energian kaukolämpöverkkoon on kytkettynä yhteensä 4 930 lämmönjakohuoneisto. Taulukosta 1 näkee, kuinka lämmönjakohuoneet jakautuvat rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan. Eniten asiakkaina on pientaloja sekä kerrostaloja. [11]

Taulukko 1. Kaukolämpöasiakkaat rakennustyyppit [11].

Tyyppi	Lukumäärä
Pientalot	2341
Kerrostalot	1490
Toimistot	209
Liiketilat	154
Teollisuus	448
Julkiset rakennukset	208
Muut	80
<b>Yhteensä</b>	<b>4930</b>

Vantaan Energia kerää asiakkaiden tietoja verkkoon liittyessä sekä tallentaa jatkuvasti asiakkaiden kulutushistoriatietoja. Tietoja käytetään laskutukseen ja verkon hallintaan. Yhtiöllä on käytössä seuraavat tiedot

- rakennustyyppi
- sijainti
- rakennusvuosi
- asuntojen lukumäärä
- kerrosala
- rakennustilavuus
- energiamäärä, kWh (kumulatiivinen)
- vesimäärä, m<sup>3</sup> (kumulatiivinen)
- huipputeho, kW (tuntikohtainen)
- menolämpötila, °C (tuntikohtainen)
- paluulämpötila, °C (tuntikohtainen)
- lämpötilaero, °C (tuntikohtainen). [11; 12]

Vantaan Energialla on käytössä joitakin eri ohjelmistoja verkon suunnitteluun, ylläpitoon ja mallintamiseen. Asemakuvien suunnittelussa ja muokkaamisessa käytetään Bentley Map Powerview -ohjelmaa, joka on paikkatieto- ja 3D-suunnitteluohjelma. Ohjelmassa on lisäosina TerraOpen-, TerraHeat- ja TerraModeler- laajennukset, joita käytetään tausta-aineiston lataamiseen ja linjojen suunnitteluun. Verkon mallintamiseen ja laskentaan on käytössä Trimble NIS. Kunnossapidon ja suunnittelun työkaluna käytetään KeyDH-ohjelmaa verkkotietojen tallentamiseen ja työnsuunnitteluun. [13]

Kaukolämpöverkosta on luotu verkkokartta, joka on kaukolämpöverkon verkkomalli. Verkkokartta sisältää asiakastietoja, kuten sopimustehoja ja kulutusmittaustietoja. Kaukolämpöverkon tietoja verkkomallista löytyy putkistotietoja kuten valmistumisvuosi, eristetyyppi, kaukolämpökaivojen sijaintitiedot ja kunnossapitohistoriatietoja. Verkosta suoritetaan staattista mallintamista, jossa putkien ominaisuuksien perusteella saadaan laskettua painehäviöt, verkon paine ja lämpötila. [8; 13]

### 3 Rakennuksen energiatehokkuus

Tässä luvussa käsitellään rakennuksen energiatehokkuuteen ja energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tarkastellaan modernin taloautomaation ominaisuuksia.

Rakennukset vastaavat 40 %:sta Suomen energiankäytöstä sekä aiheuttavat 30 % kasvihuonekaasupäästöistä. Olemassa olevien rakennuksien energiatehokkuudella on suuri vaikutus Suomen energiankulutukseen sekä sen aiheuttamiin päästöihin. Korjausrakentamisella ja uudisrakennuksien energiatehokkuudella on näin ollen merkittävä vaikutus tulevaisuuden energiankulutukseen. Energiankäytöstä aiheutuu suurimmat päästöt ja asumiskustannukset rakennuksen elinkaaren aikana. Rakennusmääräykset ohjaavat uudisrakentamista energiatehokkaampaan suuntaan ja uutta rakennettaessa on mahdollista miettiä uusia näkökulmia rakennuksien energiatehokkuuteen.

Suomen valtion kestävä kehityksen yhtiö Motiva suosittelee, että uudiskohdetta rakennettaessa tavoitellaan olemassa olevia asetuksia tiukempia energiatehokkuustavoitteita ja suunnitellaan energiatehokkuustavoitteet leikkaamaan koko rakennuksen elinkaari. Korjausrakentamisessa on useimmiten kustannustehokkaampaa tavoitella matalampaa energiankulutusta ennemmin kuin suunnitella täysin uusi lämmitysmuoto rakennukseen. Korjausrakentamisessa kannattaa tavoitella kustannustehokkaita keinoja energiatehokkuuden parantamisessa ja huomioida energiakatselmuksissa tehdyt havainnot. [14]

#### 3.1 Energiatehokkuus

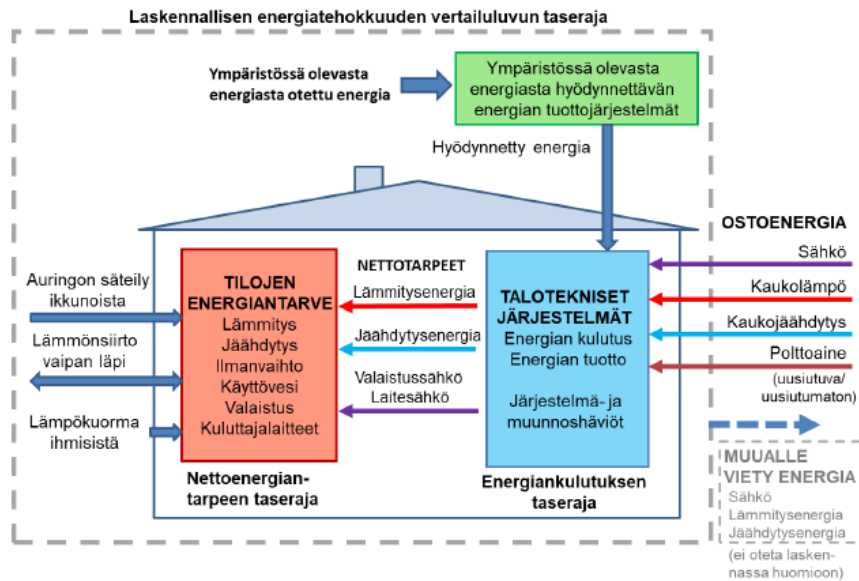
Tässä luvussa käsitellään ympäristöministeriön rakentamismääräyskokoelman energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennan ohjeessa lueteltuja menetelmiä rakennuksen energiatehokkuuden laskemiseen. Ohje on vuonna 2018 tulleen energiatehokkuussäädöksen soveltamiseen tarkoitettu dokumentti.

Ohjetta käytetään energiatehokkuuden vertailuluvun laskemiseen. Vertailulukua ei itsessään ole sopiva kertomaan rakennuksen energiankäytön tarpeesta, vaan lukua voidaan käyttää vertaillen rakennuksia keskenään. Kuitenkin laskentamenetelmät antavat hyvän kuvan rakennuksen energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Seuraavissa luvuissa keskitytään lähinnä tilojen lämmittämisen energiankulutukseen ja siihen vaikuttaviin tekijöihin. [15, s. 2.]

### 3.1.1 Energiatehokkuuslaskennan periaatteet

Laskennassa käytetyt menetelmät ovat yksinkertaistettuja ja ne huomioivat oleellimmat rakennuksen energiankulutuksen tekijät ja ominaisuudet Suomen olosuhteissa. Menetelmät perustuvat pääsääntöisesti SFS-EN 13790 -standardiin. Laskennassa käytetään kolmentyyppisiä lähtötietoja: rakennuskohtaiset lähtötiedot, rakennuksen käyttötiedot sekä ohjeeseen perustuvat laskentamenetelmien ohjearvot. Rakennuskohtaiset tiedot ovat yleensä saatavilla rakennuksen suunnitelmista. Laskentamenetelmässä rakennusta käytetään yhtenä laskentakokonaisuutena. Tarvittaessa on mahdollista jakaa rakennus pienempiin kokonaisuuksiin. Kuvassa 4 on rakennuksen laskennallisen energiatehokkuuden vertailuluvun taseraja sekä lämpötase, jossa on lueteltu energiankulutukseen vaikuttavat tekijät. Näitä ovat muun muassa talotekniikan tarvitsema energia, ihmistoiminnan ja auringon lämpökuorma sekä lämpöhäviöt. [15, s. 14–15.]





Kuva 4. Laskennallisen energiatehokkuuden taseraja [15, s. 15].

Rakennuksen vuotuista energiantarvetta nettoalaa kohden käytetään yksikköä kWh/(m<sup>2</sup>a), jossa nettoala (m<sup>2</sup>) on rakennuksen lämmitettävän alueen pinta-ala. Pinta-alan laskennassa huomioidaan kaikki yli 1 600 mm korkeat huonealat ulkoseinät mukaan lukien. Rakennuksen energiankulutuksen tekijät näkyvät seuraavasta kaavasta:

$$RAK_{ek} = (Q_{lämmitys,tilat} + Q_{lämmitys,iv} + Q_{lämmitys,lkv} + Q_{jk} + W_{tilat} + W_{tilat} + W_{ilmanvaihto} + W_{lkv,pu} + W_{kuluttajalaitteet} + W_{valaistus})/A_{netto}$$

$RAK_{ek}$  on rakennuksen energiankulutus, kWh/(m<sup>2</sup>a).

$Q_{lämmitys,tilat}$  on tilojen lämmityksen lämpöenergian tarve, kWh/(m<sup>2</sup>a).

$Q_{lämmitys,iv}$  on ilmanvaihdon lämmityksen lämpöenergian tarve, kWh/(m<sup>2</sup>a).

$Q_{lämmitys,lkv}$  on lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve, kWh/(m<sup>2</sup>a).

$Q_{jk}$  on jäähdytysjärjestelmällä tuotettu jäähdytysenergia, kWh/(m<sup>2</sup>a).

$W_{tilat}$  on lämmönjakojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus, kWh/a.

$W_{ilmanvaihto}$  on ilmanvaihtojärjestelmän sähköenergian kulutus, kWh/a.

$W_{lkv,pu}$  on lämpimän käyttöveden kiertopumpun sähköenergian kulutus, kWh/a.

$W_{kuluttajalaitteet}$  on kuluttajalaitteiden sähköenergian kulutus, kWh/a.

$W_{valaistus}$  on valaistuksen sähköenergian kulutus, kWh/a.

$A_{\text{netto}}$  on rakennuksen lämmitetty nettoala,  $\text{m}^2$ . [15, s. 16.]

Tilojen lämmitysenergian nettotarve muodostuu johtumislämpöhäviöstä, korvaus- ja tuloilman lämmittämiseen käytettävästä energiamäärästä sekä vuotoilman lämpöhäviöstä. Näistä vähennetään auringon ja sisäisten lämpökuormien vaikutus. Lisäksi tulee ottaa huomioon myös käyttöveden lämmitykseen kuluva energia lämmitysenergian tarvetta arvioitaessa. [15, s. 2.]

### 3.1.2 Lämpöhäviöt

Rakennuksissa lämpöhäviöt tapahtuvat rakenteiden lävitse. Näitä ovat ulkoseinät, ylä- ja alapohja, ikkunat ja ovet. Lisäksi lämpöhäviötä tapahtuu muihin lämmittämättömiin tiloihin johtumalla. Laskennassa otetaan huomioon myös kylmäsiltojen vaikutus. Laskenta suoritetaan jokaisen rakenteen kohdalla. Lämpöhäviöitä määrittäessä käytetään vuosittaisia lämpötilakeskiarvoja. Maanvaraisessa alapohjassa ja maanpinnan alapuolisten seinien lämpöhäviön laskennassa käytetään maaperän keskilämpötilaa. Ohjeissa on taulukoitu viitearvoja lämpösiltojen vaikutuksien arvioinnissa erityyppisten rakenteiden kohdalta. Esimerkiksi ulkoilmaan rajoittuvien rakenteiden kautta johtuvat lämpöhäviöt määritetään seuraavalla kaavalla:

$$Q_{\text{rakosa}} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000$$

$Q_{\text{rakosa}}$  on johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi, kWh.

$U_i$  on rakennusosan lämmönläpäisykerroin,  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

$A_i$  on rakennusosan  $i$  pinta-ala,  $\text{m}^2$ .

$T_s$  on sisäilman lämpötila,  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_u$  on ulkoilman lämpötila,  $^{\circ}\text{C}$ .

$\Delta t$  on ajanjakson pituus, h.

1000 on yksikkömuunnoskerroin. [15, s. 18.]

Vuotoilman lämmittämiseen kuluvan energian tarpeeseen vaikuttavat rakennuksen vaipan ala ja rakennuksen tiiveys. Laskennassa hyödynnetään rakennuksen maanpäällistä korkeutta. Vuotoilmavirta syntyy lämpötilan ja

tuulen synnyttämistä paine-eroista. Vaikuttavia tekijöitä ovat myös rakennuksen sijainti, korkeus, vaipan ilmanpitävyys sekä ilmanvaihtojärjestelmä. Vuotoilmaksi ei huomioida sitä ilmamäärää, jonka ilmanvaihtojärjestelmä tarvitsee korvausilmaksi. [15, s. 22.]

### 3.1.3 Lämmitysjärjestelmän energiankulutus

Lämmitysjärjestelmän lämmitysenergian tarpeessa huomioidaan rakennuksessa käytössä olevat lämmitysmuodot, esimerkiksi jos rakennuksessa käytetään ilmasta-ilmaan lämpöpumppuja tai tulisijoja, jotka vähentävät lämmitysjärjestelmän lämmitystarvetta. Lämmitysjärjestelmän hyötysuhde otetaan huomioon lämmitysjärjestelmän energiantarvetta arvioitaessa. Lisäksi lämmönjakojärjestelmän lämpöhäviöt maahan ja ulkoilmaan ovat vaikuttavia tekijöitä. Jos tulisijoista ei ole tarkempaa hyötysuhdetta tiedossa, voidaan arvioida, että vuosittainen lämmöntuotto on 3 000 kWh. [15, s. 48–49.]

### 3.1.4 Lämpökuormat

Rakennuksien energiantarpeeseen vaikuttavat rakennuksen sisäiset lämpökuormat. Näistä yleisimpiä ovat

- rakennuksen käyttäjät
- laitteet ja valaistus
- ikkunoista tuleva auringon säteilyenergia
- lämpimän käyttöveden kierron ja varastoinnin lämpöhäviöt. [15, s. 31.]

Lämpökuorman vaikutuksien arvioinnissa otetaan huomioon rakennuksen käyttöaste. Henkilöistä johtuvassa lämpökuormassa käytetään lämpötehoarvona 85 W:a/henkilö. Laitteiden ja valaistuksen lämpökuorman määrittämiseen voidaan käyttää laitteiden sähkötulotusta, joka arvioidaan kokonaisuudessaan lämpökuormaksi. Lämpimän käyttöveden lämpökuorma on

merkitsevä tekijä siinä tilanteessa, että putket ja varaaja sijaitsee rakennuksen vaipan sisäpuolella. [15, s. 31, 35.]

Ikkunoista tulevan auringon lämmitysenergia on ikkunoista absorboitunut lämpö sekä suoraan rakennukseen sisälle tuleva energia. Auringon tuoman energiamäärässä vaikuttavia tekijöitä ovat vaakatasolle tulevan aurinkoenergian määrä pinta-alaa kohden sekä pystypinnalle tulevan auringon säteilyenergia. Myös ikkunan rakenne ja käytössä olevat verhot, vaikuttavat auringon tuottamaan energiamäärään. Lämpökuorman arvioinnissa käytetään kertoimia, joilla muutetaan pinnan vastaanottama energia vastaamaan vaikuttavaa ilmansuuntaa ja auringon kulmaa vuodenajan perusteella. Lämpökuorman arvioinnissa huomioidaan ympäristön aiheuttamat varjostukset kuten maasto, rakennukset, puut ja muut varjostavat rakenteet. Lämpökuorma voidaan hyödyntää rakennuksen lämmittämisenä, jos samanaikaisesti esiintyy lämmitystarvetta ja säätölaitteet pystyvät huomioimaan lämmitystarpeen alenemisen huoneessa. [15, s. 32–35.]

### 3.1.5 Käyttövesi

Lämpimän käyttöveden energiantarpeeseen vaikuttavat lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde, varastoinnin ja kierron häviö sekä mahdollinen lämmön talteenotto jätevedestä. Kierron lämpöhäviöt vaihtelevat hieman eri talotyyppien välillä. Näiden tekijöiden lisäksi myös putken tyyppi ja eristepaksuus vaikuttavat. Lämpimän käyttöveden varastoinnin lämpöhäviöihin vaikuttavat säiliön tilavuus sekä eristeen paksuus. Mikäli kiertojohdon tarkkaa pituutta ei ole tiedossa pystytään tätä arviomaan rakennustyyppin ja kerrosten lukumäärän perusteella. [15, s. 47.]

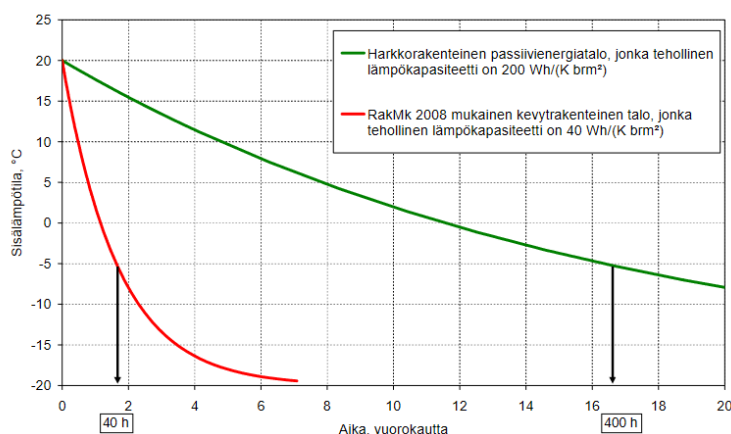
Käyttöveden lämmittämiseen käytettävän energian suuruutta arvioidaan kulutusperusteisesti. Voidaan olettaa, että yksi henkilö käyttää asunrakennuksessa lämmintä vettä 50–60 l/vrk. Siinä tilanteessa, että on saatavilla rakennuksen vedenkulutustiedot, niin voidaan olettaa, että lämpimän veden osuus on 40 % kokonaiskulutuksesta. [15, s. 26.]



kohdentumaan sähkön hinnan ollessa alhaalla. Standardin mukainen järjestelmä on helposti muunneltavissa ja laajennettavissa eri valmistajien standardia noudattavilla tuotteilla. [17; 18]

### 3.3 Lämpövarasto

Rakennusmateriaaleilla on erilaisia lämmönsitomisominaisuuksia, jotka vaikuttavat rakennuksen energiatehokkuuteen. Yleisistä rakennusmateriaaleista betonilla ja tiilellä on hyvä lämpökapasiteetti ja keskinkertainen lämmönjohtokyky. Puulla on hyvä lämpökapasiteetti, mutta huonon lämmönjohtavuuden vuoksi se toimii energiavarastona huonosti. Teräs taas varastoi hyvin, mutta lämmönjohtavuus on liian suuri. Näin ollen betoni ja tiili tarjoaa parhaat ominaisuudet lämmön varastoitumiseen ja sen hitaaseen luovuttamiseen. Massiiviseksi rakennukseksi, jolla on hyvä lämmönvarastointipotentiaali, luokitellaan rakennukset, joiden lämmöneristyksen sisäpuolella oleva massa on vähintään  $500 \text{ kg/m}^2$ . [19; 20] Seuraavassa kuvassa on esitetty kahden erityyppisen rakennuksen käyttäytymistä ulkolämpötilan ollessa  $-20^\circ\text{C}$ .



Kuva 6. Rakennuksien lämpökapasiteettieroja [20].

Raskaana rakenteena betoni sitoo lämpöä eri lähteistä kuten auringosta ja laitteista ja luovuttaa sitä myöhemmin sisätiloihin. Raskaat lämpöä sitovat rakenteet tasaavat sisälämpötilan vaihtelua. [20, s. 7.]

## 4 Digitaalinen kaksonen

Tässä luvussa käsitellään digitaalisten kaksosten hyötyjä ja validointiprosessia. Lisäksi esitellään ohjelmistoja ja tekniikoita, joita voidaan käyttää, kun luodaan digitaalista kaksosta. Yksinkertaistettuna digitaalinen kaksonen on digitaalinen esitys fyysisestä järjestelmästä. Digitaalinen kaksonen on uusi tapa lähestyä tuotemallintamista sekä piirustusten tuottamista. [21]

### 4.1 Käyttökohteet

Fyysiset järjestelmät ovat usein monimutkaisia kokonaisuuksia, joten myös digitaalisesta versiosta muodostuu monimutkainen kokonaisuus, jolla pyritään mukailemaan fyysisen järjestelmän tilanteita ja tilaa mahdollisimman tarkasti. Tyypillisesti digitaalinen kaksonen luodaan tilanteesta, jota halutaan seurata tai kehittää mallintamalla eri skenaarioita. Malli voi seurata esimerkiksi fyysisen järjestelmän antureita, materiaalivirtoja, ympäristöolosuhteita tai vikaantumisia. Digitaalinen kaksonen voidaan luoda yksittäisestä koneesta, linjaston osasta tai kokonaisesta kaupungista, kuten Singaporessa on tehty. [21; 22]

Kaksosta voidaan hyödyntää muun muassa tuotekehityksessä, markkinoinnissa, kunnonvalvonnassa sekä koulutuksissa. Mallinnukset ovat tyypillisesti visuaalisia esityksiä, joista oleelliset tekijät nousevat esille selkeästi. Digitaalista kaksosta pystyy tarvittaessa muokkaamaan esimerkiksi niissä tilanteissa, kun halutaan laajentaa järjestelmää tai testata uutta järjestystä tuotantohallissa. Koneoppiminen ja keinoäly tuovat mahdollisuuden luoda monimutkaisen järjestelmän, jolla pystyy simuloimaan tapahtumien kulun, muutoksien vaikutukset ja jopa ennustamaan tulevia tilanteita. Digitaalisen kaksosen edut kasvattavat jatkuvasti kiinnostusta sen luodessa uuden lähestymistavan ymmärtää ja analysoida muuttuvien tekijöiden vaikutuksia. [21; 23, s. 16.]

## 4.2 Teknologia

Kehittynyt digitaalinen kaksonen, jossa ilmenee fysikaalinen käyttäytyminen, jota on täydennetty käyttöhistoriatiedoilla antaa mahdollisuuden ymmärtää muiden prosessien väliset riippuvuudet. Digitaaliset kaksoiset voivat toimia yksinäisinä kokonaisuuksina, tai ne voidaan lisätä laajaan kokonaisuuteen, jolla pystytään mallintamaan suurien järjestelmien, kuten rakennuksien tai kortteleiden toimintaa. Mahdollisuus mallintaa toimintoja antaa edellytykset ymmärtää sekä kehittää laajojen kokonaisuuksien toiminnallisuutta sekä ennakoida muutoksien kustannusvaikutuksia. [23, s. 17.]

Erilaisia analysointimenetelmiä pystytään liittämään digitaaliseen malliin. Perusmalli pystytään toteuttamaan perinteisellä taulukkolaskentaohjelmalla tai muulla mallinnusohjelmalla. Laajemman järjestelmän, jossa on paljon keskinäisiä riippuvaisuuksia, mallintamiseen vaaditaan kehittyneempi työkalu. Koneälyn ja koneoppimisen avulla voidaan tunnistaa rakenteita ja ristiriitoja, joita ei normaalisti tunnistettaisi. Tämä ominaisuus on tärkeä kehittyneille malleille, jotka hallinnoivat suurta monitahoista tietomäärää ja seuraavat muutoksien vaikutuksia usealla tasolla jatkuvasti. Yhtä lailla malleilta voidaan vaatia kykyä ymmärtää energiavirtoja, materiaalin käyttäytymistä tai vesisysteemejä. Kehittyneet ohjelmat tarjoavat uuden tavan ymmärtää kaupunkien, yhteisöjen tai rakennuksien toimintaa sensoreiden, kehittyneen analysoinnin ja visualisointityökalujen avulla. [23, s. 22.]

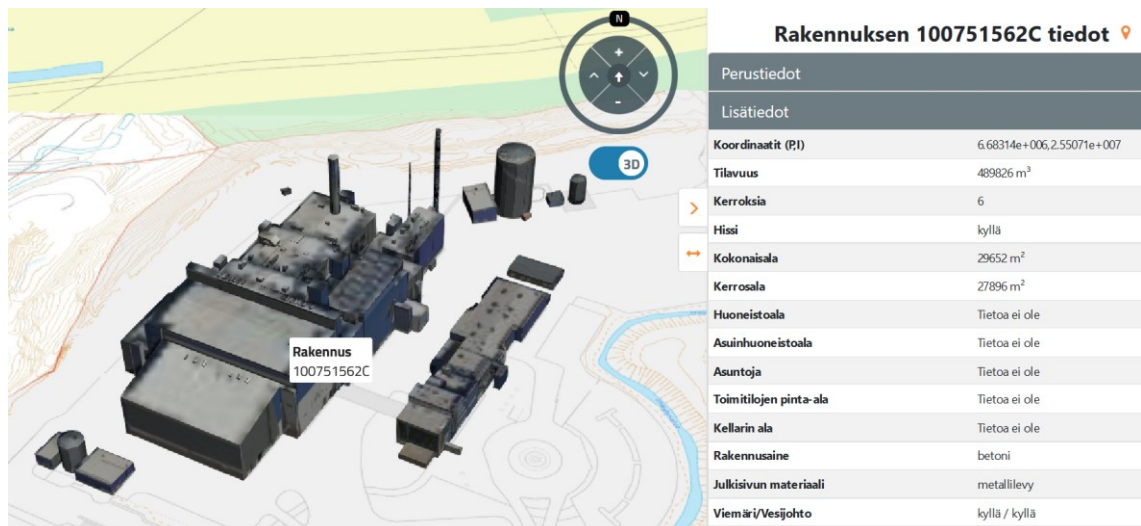
Verkon mallintamiseen käytettävän työkalun valinnassa vaikuttaa mallintamisen tarpeet. Työkalujen valinnassa tärkein ominaisuus on työkalujen yhteensopivuus. Laajojen kokonaisuuksien mallintamisessa voidaan käyttää monolite-mallintamismenetelmää tai co-simulation-menetelmää. Monolite-mallissa koko järjestelmä on simuloitu ja mallinnettu yhdellä työkalulla. Co-simulation-menetelmässä käytetään useita työkaluja, jotka soveltuvat parhaiten mallinnettavan järjestelmän osan mallintamiseen. [24]



Co-simulation-menetelmässä yleisesti käytetty simulointistandardi on Functional Mockup Interface (FMI), joka on merkittävästi kasvattanut kykyä yhdistää eri työkaluilla tuotettuja malleja. Esimerkiksi työkaluun voidaan yhdistää MATLAB- tai Simulink-alustoilla tuotettuja osioita. MATLAB ja Simulink ovat MathWorks-yhtiön ohjelmointi- ja numerolaskenta-alustoja, joita käytetään hyvin yleisesti muun muassa data-analysoinnissa, simuloinnissa, visualisoinnissa, algoritmien kehittämisessä, ohjelmien luonnissa ja mallintamisessa. Myös Modelica on yleisesti käytetty ohjelmointikieli kaukolämpöverkkojen mallintamiseen teollisuudessa. Kielen etuja ovat objektipainotteisuus, josta on hyötyä ison kokonaisuuden mallintamisessa, sekä kaavaorientoituneisuus, joka auttaa fysikaalisten ominaisuuksien mallintamisessa. Julia-ohjelmointikieli taas on herättänyt kiinnostusta suorituskäytännönsä vuoksi. Myös indoor climate and energy IDA ICE on käytetty ohjelmisto kaukolämpöverkon paremman skaalautuvuuden vuoksi. [24; 25; s. 7.]

Mallin luominen automaattisesti on mahdollista GIS (Geographical information system) -tietojen perusteella, ja monet alustat tukevat sitä. GIS-tietojen lisäksi voidaan käyttää rakennuksien BIM-malleja (building information models) tai CAD-piirustuksia. Kaukolämpöverkon kulutuksen ennustamiseen voidaan käyttää apuna CityGML City (Geography Markup Language) -3D-kaupunkimalleja. CityGML on avoin standardi, jota käytetään kaupunkien 3D-mallien luomiseen. CityGML-standardista puuttuu oleellisia rakennuksien energiankulutusparametreja. Standardiin on kuitenkin saatavilla laajennus Application Domain Extensions (ADE), jolla voi lisätä rakennuksen energiankulutuksen metatietoja CityGML-tietoihin. [25, s. 9.]

Kuvassa 7 on kuvakaappaus Vantaan Energian jätevoimalan 3D-karttakuvasta, joka on otettu Vantaan verkkopalvelusta. Palvelussa on hyödynnetty CityGML-standardia



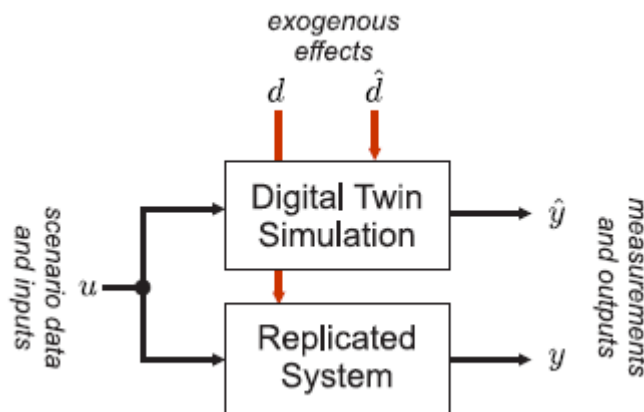
Kuva 7. Vantaan Energian jätevoimala 3D [27].

Mallintamisessa hyödynnetään fysikaalisiin ominaisuuksiin tai käyttötietoihin perustuvaa dataa. Hiljattain dataan perustuvat koneoppimisen muodot ovat yleistyneet kuten Artificial Neural Network (ANN), jossa perinteisen jos–niin-ajattelun sijaan opetetaan tekoäly suoraan tunnistamaan erilaisia tapahtumatilanteita. Kaukolämpöverkoissa koneoppimista on hyödynnetty lämpötilantarpeen ennustamisessa. Kuitenkin laajan kaukolämpöverkon mallintamisessa on useita rajoitteita, kuten se, miten malli saadaan oppimaan verkon tilanteita, joita ei ole vielä tapahtunut tai kuinka järjestelmä saadaan konfiguroitua vastaamaan fyysistä versiota riittävällä tarkkuudella. Yksi menetelmä on grey-box-malli, jossa fyysisen mallin fysikaalisia ominaisuuksia täydennetään dataohjatulla black-box-mallilla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää fysikaalisiin ominaisuuksiin perustuvaa mallia opettamaan dataohjattua mallia. [25, s. 7.]

#### 4.3 Validointi

Tärkeä vaihe mallintamisessa ja mallin kalibroinnissa on validointi. Validointiprosessilla määritetään, kuinka tarkasti digitaalinen kaksonen vastaa fyysistä versiota. Validointiin käytettäviä tietoja ei välttämättä ole hyödynnetty mallintamisessa, ja ne saattavat olla uutta informaatiota mallille. [25, s. 12.]

Kuvassa 8 on havainnollistettu validoinnin määrittystä. Digitaalisesta kaksosesta saatavan syöte  $\hat{y}:n$  sekä järjestelmästä saatavan syötä  $y:n$  erotus kertoo mallin luotettavuudesta. Tätä eroavaisuutta voidaan vertailla eri mallien kehitysversioiden kesken. Erotus on usein määritetty esimerkiksi pienimmän neliösumman menetelmällä tai absoluuttisella keskiarvon prosentuaalisella virheellä.



Kuva 8. Validointiprosessi [25, s. 12].

Riittävän tarkkojen arvojen löytäminen on monissa tapauksissa vaativa tehtävä, sillä järjestelmään liittyy useita ulkopuolisia tekijöitä. Fyysisen järjestelmän ulkopuolisten tekijöiden pyritään toisintamaan suunnitteluparametreilla, jotka vaikuttavat digitaalisen kaksosen toimintaan. Nämä voivat olla osittain hankittu käyttöhistoriatiedoista ja osittain mallinnettu. Suunnitteluparametreja voivat olla esimerkiksi kaukolämpöputkia ympäröivän maaperän lämpötila, rakennuksen kulutuskäyttäytyminen, putken geometria, kuluttajan tai operaattorin käyttäytyminen tai automaattisten ohjausjärjestelmien parametrit. [25, s. 12.]

Validoinnissa on tärkeää määrittää, mikä on riittävä tarkkuus digitaaliselle kaksoselle. Korkea tarkkuus menee käsi kädessä monimutkaisuuden ja laskentatehon kanssa. Oleellista on löytää se tarkkuus, jolla järjestelmästä saadaan tarvittava hyöty mahdollisimman yksinkertaisella toteutuksella. Validoinnissa pienimmän neliösumman menetelmä ei ota huomioon dynaamista käyttäytymistä, joten sen viiveellinen dynaaminen vaihtelu voidaan nähdä

suurena poikkeamana digitaalisessa kaksosessa. Tämän ehkäisemiseksi on olemassa joitain lähestymistapoja, kuten epälineaarinen tasausmenetelmä. Myös tilanteet, joissa tapahtumaa a seuraa tapahtuma b, on haasteellista validoida. Vaikka on olemassa validointimenetelmiä yksittäisten järjestelmien validointiin. Kuitenkin on olemassa vielä haasteita laajojen kokonaisuuksien validoinnissa, josta on vähän tutkimustietoa olemassa. [25, s. 13.]

Digitaalisen kaksosen ja fyysisen järjestelmän syötteen eroihin vaikuttaa useita tekijöitä. Näitä voivat olla esimerkiksi

- tuntemattomat ulkopuoliset tekijät, joista ei pystytä luomaan tarkkaan suunnitteluparametria, jolla ohjata digitaalisen kaksosen toimintaa
- mallinnusvirheet, jotka ovat tyypillisiä kaikenlaisissa mallintamisessa
- komponenttien ja laitteiden kuluminen, joka on oleellinen osa niiden elinkaarta
- dokumentoimattomat havainnot fyysisestä versiosta, joita on saatettu jo huomata validoinnin yhteydessä, mutta joiden dokumentointi on puutteellinen
- raportoimattomat järjestelmämuutokset. [25, s. 14.]

Fyysisen järjestelmän seurannan mahdollisuus parantaa kalibroinnin tarkkuutta. Mitä enemmän järjestelmästä on antureita, joilla verrata simuloinnin tarkkuuta, sitä parempi simuloinnin luotettavuus pystytään saavuttamaan. [25, s. 15.]

#### 4.4 Haasteet

Digitaalisen kaksosen rakentamisessa on hyvä tiedostaa projektin monimutkaisuus. On eittämättä haasteellista rakentaa malli, johon on yhdistetty tuotteen elinkaaren hallinta, tuotantolaitokset, kuluttajat, toiminnanohjausjärjestelmä ja lukuisia muita komponentteja. Prosessin siirtäminen tuotannonohjausjärjestelmään ja pilvipalvelimelle, vaatii yhdessä suunnittelusta vastaavan tahon kanssa luodut tarkat ja yksiselitteiset työohjeet. Tuotantolaitokset ja käytännöt on mahdollisuuksien mukaan myös muutettava vastaamaan suunnitelman ja mallin ylläpidon tarpeita. On myös suunniteltava,

kuinka rakentaa kattava digitaalinen kaksonen, kun tyypillisesti on totuttu laatimaan malli fyysisestä järjestelmästä. Tavoitteena on kuitenkin luoda malli, joka kerää jatkuvasti tietoa ja joka on jatkuvan kehityksen ja muutoksen alaisuudessa. Merkittävä haaste tulee myös suuren tietomäärän hallinnassa, jota syntyy, kun kerätään reaaliaikaista dataa. Loppujen lopuksi suuren tietomäärän analyysistä on tavoite saada poikkeustilanteiden syy–seuraus-suhteet esille. Haasteita tuo myös se, ettei ole olemassa vakiintuneita optimoituja keinoja integroida jo olemassa olevia malleja digitaalisiksi kaksosiksi tai yhdistellä olemassa olevia järjestelmiä. Lisäksi rajapintojen luominen tiedon tarjoajan ja tiedon tarvitsijan välillä voi välillä olla vähintäänkin puutteellista, kun käytössä on useita palvelimia ja menetelmiä. [28, s. 7.]

#### 4.5 Ohjelmistoesimerkki IES ICL

The Integrated Environmental Solutions Intelligent Communication Lifecycle on yksi esimerkki ohjelmistosta, joka soveltuu kaupungin kokoisen digitaalisen kaksosen toteutukseen. Se antaa hyvän kuvan siitä, millaisia ominaisuuksia ja työkaluja digitaalinen kaksonen tarjoaa. Järjestelmä kokoaa yhteen mallinnuksen, analysoinnin ja optimoinnin työkalut monimutkaisessa energiasysteemissä. Se tarjoaa alustan, joka on erityisesti suunniteltu monisektorisen useiden sidosryhmien projektin toteuttamiseen. Tässä luvussa on esitelty järjestelmän työkaluja ja komponentteja.

### Intelligent Community Design (iCD)

iCD on 3D- ja pääsuunnittelutyökalu kaupungeille, kampuksille, kortteleille sekä muille monimutkaisille kokonaisuuksille. Työkalulla pystytään hahmottamaan yksinkertaisista ominaisuustiedoista yhteisön energiavirtojen tai resurssien käyttöä ja tunnistaa potentiaalisia syy-seuraus-tilanteita.

### IES Virtual Environment (IESVE)

IESVE on dynaaminen simulointiympäristö, joka avaa syväanalyysin rakennuksien energiavirroista ja fysikaalisesta käyttäytymisestä. Työkalulla pystytään toisintamaan simuloiden rakennuksen tai koko yhteisön energia- ja lämpövirrat. Virtuaalinen malli perustuu iCD:lla tuotuun tietoon ja käyttödataan.

### Intelligent Control and Analysis (iSCAN)

iSCAN kerää käyttötietoja useista lähteistä tarjoten selkeän näkymän kootuista tiedoista. Työkalu hyödyntää koneälyä ja muita analyysimenetelmiä, joilla helpotetaan käyttäjiä tunnistamaan ongelmia ja ristiriitoja.

### Intelligent Virtual Network (iVN)

iVN on simulointityökalu, jolla simuloidaan verkostoja, kuten lämmitys-, jäähdytys- tai sähköverkostoja. Lisäksi työkalulla pystytään mallintamaan esimerkiksi rakennuksia ja akkuja.

### ICL Collobration Cloud

ICL Collobration Cloud on pilvipohjainen työkalujen ekosysteemi interaktiiviselle 3D-ympäristölle, joka kerää livetietoja jokaiselta ICL-työkalulta. Työkalu yhteensovittaa digitaalisen kaksosen tiedot ja tarjoaa läpileikkauksen koko mallista. [23, s. 23.]

## 5 Case Luulaja

Luulajassa, Ruotsissa oli käynnissä OPTi-Sim-projekti vuosina 2015–2018 Luulajan teknillisen yliopiston koordinoimana. Projektilla pyrittiin uudelleen ajattelemaan kaukolämpöverkkojen arkkitehtuuria sekä ohjausta luomalla Luulajan kaukolämpöverkosta digitaalinen kaksonen. OPTi-Sim-projektilla etsittiin toimintatapoja sekä työkaluja, jotka tuottavat tarkkoja mallinnuksia jo olemassa olevavasta kaukolämpöverkosta sekä suunnitelluista kaukolämpöverkon osista. Malli luotiin kaukolämpöverkosta sekä rakennuksista. OPTi-Sim-projektissa tavoiteltiin energiansäästöjä ja kulutushuippujen tasaamista. Projektin mitattavina tavoitteina olivat kulutuksen alentaminen 30 %, kulutushuippujen alentaminen 40 % ja luoda digitaalinen kaksonen 95 % tarkkuudella. Kulutuksen alentamistavoitetta jouduttiin laskemaan 10 %:een projektin aikana. Projektiin liittyi myös Mallorcalla suoritettava pilotointi, mutta tässä luvussa käsitellään vain Luulajan kaukolämpöverkon digitaalista kaksosta. Kokonaisuudessaan OPTi-Sim-projekti kesti 32 kuukautta ja budjetti oli 2,1 miljoonaa euroa. [29; 30]

LuleKraft-yhtiön kaukokylmä ja -lämpöverkkoon on kytketty 31 000 taloutta, ja pääasiallinen tuotantomuoto on CHP-voimala, joka saa polttoaineen viereisen SSAB:n tehtaan sivuvirroista. CHP-voimalan lisäksi Luulajan kaukolämpöverkossa on lämmöntarvehuippuja varten lämpövoimalaitoksia, joiden kokonaisteho on 350 MW. Lämpövoimaloilla voidaan tarvittaessa kattaa Luulajan lämmöntarve. Energiayhtiö investoi kaukolämpöverkon laajennukseen vuosien 2014–2018 välillä ja se teki kohteesta oivallisen paikan pilotoida OPTi-Sim-järjestelmää. Luulajassa ajettiin projektin aikana neljä simulointipilottia. Pilotoinneissa osa rakennuksista oli testirakennuksia, joissa tehtiin mittauksia elinolosuhteissa projektin aikana. Projektilla oli neljä päätavoitetta: kulutushuippujen alentaminen, lämpöverkon lämpötilan alentaminen, verkon rajoituksien simulointi sekä lämpökeskuksen pääventtiilien optimointi. [31]

## 5.1 Rakennuksien energiankulutuksen mallintaminen

Luulajan OPTi-Sim-projektissa hyödynnettiin black-box- ja grey-box-simulointia. Mallissa on valittu pilottirakennuksia, joihin on asennettu sensoreita grey-box-malleja varten. Black-box-malleja käytettiin rakennuksista, joista oli saatavilla käyttöhistoriatietoja. [26, s. 6.]

### 5.1.1 Black box

Black-box-mallintamisella tässä tapauksessa tarkoitetaan erilaisia koneoppimisen menetelmiä. Näitä malleja voidaan käyttää toisintamaan energiankulutusta rakennuksissa halutulla funktiolla. Tämä funktio voidaan sitoa aikaan, lämpötilaan tai muuhun metatietoon. OPTi-Sim-projektissa käytettiin black-box-malleissa lähtötietoina: tunti, viikko, kulutustiedot ja ulkoilman lämpötila. Rakennustyyppit kategorisoitiin seuraavasti: asuinrakennukset, maalämpörakennukset, julkiset rakennukset ja kauppakeskukset. Pientalot suljettiin pois black-box-mallintamisesta. Näiden talouksien energiankulutus mallinnetaan kulutuskäyttäytymisen perusteella. Mallintamisessa testattiin eri koneoppimismenetelmiä ja havaittiin, että random forest -menetelmä osoittautui tarkimmaksi menetelmäksi. Tässä menetelmässä luodaan sattumanvaraisia tapahtumaskenaarioita (puita) ja tapahtumien todennäköisyyksien perusteella luodaan simulaationskenaario. Testaus tapahtui neljässä asuinrakennuksessa, joissa oli 60–110 asuntoa. Lisäksi mukana oli julkisia rakennuksia, kuten kaupungintalo ja kulttuuritalo. Näistä rakennuksista oli saatavilla käyttötiedot tunnin tarkkuudella. Mallinnuksessa pystyttiin saavuttamaan 80–90 %:n tarkkuus riippuen simuloitavan rakennuksen tyypistä. [26, s. 7, 58.]

### 5.1.2 Grey box

Grey-box-simuloinnissa käytetään rakennuksien käyttödatahistoriaan perustuvien tietojen lisäksi jatkuvasti mitattavia arvoja. Grey-box-mallin mitattavia ja säätöarvoja ovat



- ensiöpuolen veden massavirta (kg/s)
- ensiöpuolen veden lämpötila (°C)
- ensiöpuolen veden paluulämpötila (°C)
- toisiopuolen veden massavirta (kg/s)
- toisiopuolen veden syöttölämpötila (°C)
- toisiopuolen veden paluulämpötila (°C)
- asuintilojen sisälämpötila (°C)
- asuintilojen sisälämpötilan säätöarvo (°C)
- ulkolämpötila (°C). [26, s. 17.]

Rakennuksien simuloinnissa on huomioitu lämmitysjärjestelmän lämmönsiirtyminen rakennukseen, rakennuksen terminen kapasiteetti sekä terminen resistanssi. Lisäksi mallissa huomioitiin rakennuksen sisäiset lämpökuormat, kuten käyttäjät tai lämpöä tuottavat laitteet. [26, s. 17.]

Käyttötietoihin perustuen pystyttiin estimoimaan tai laskemaan seuraavat muuttujat:

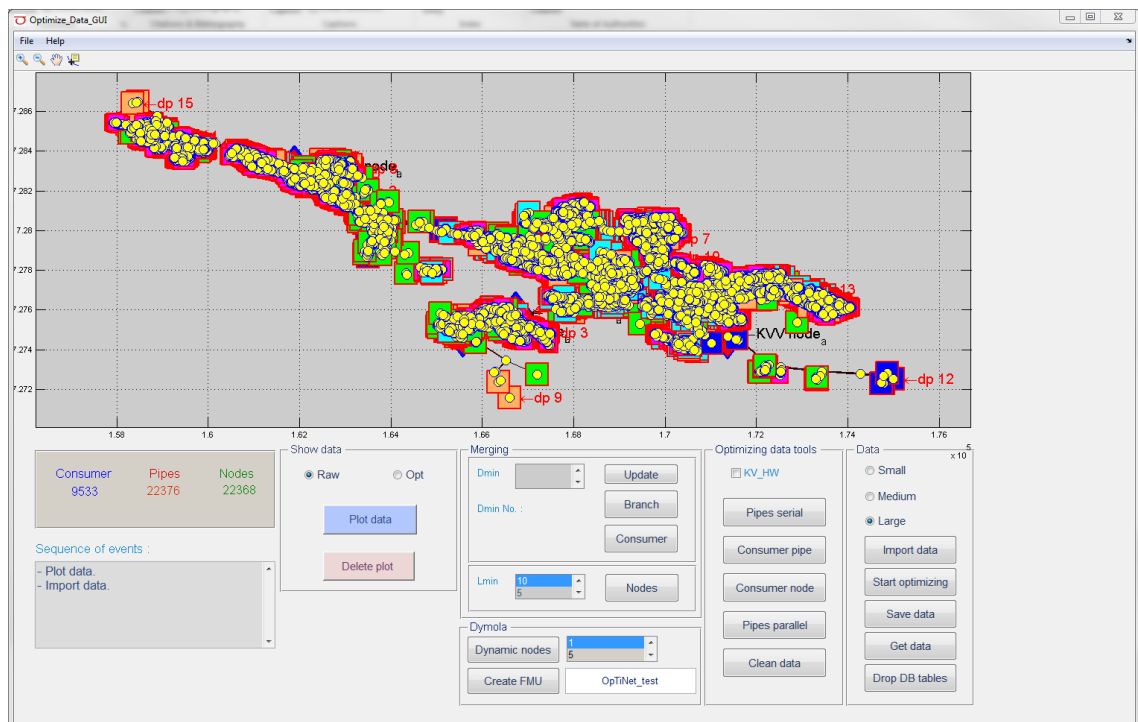
- terminen resistanssi rakennuksesta ympäristöön
- rakennuksen terminen kapasiteetti
- rakennuksien sisäiset lämpökuormat
- lämmön siirtyminen lämmitysjärjestelmästä rakennukseen
- sisälämpötilan säätölaitteen säätöarvoja
- toisiopuolen säätöarvoja. [26, s. 29.]

Grey-box-mallin rakentamisessa käytettiin yhden asuinrakennuskokonaisuuden mittauksia ja käyttöhistoriatietoja. Tähän kokonaisuuteen kuului yksi lämmönjakokeskus, josta jaettiin kahdeksaan rakennukseen lämmitys. Asuntoja kokonaisuudessa oli 126, ja näistä 72 oli varustettu sisätilojen lämpötilanturilla. [26, s. 23.]

## 5.2 Verkon mallintaminen

OPTi-Sim-projektissa käytössä oli co-simulation-menetelmä ja hyödynnettiin standardisoitua FMU-menetelmää. Projektissa käytettiin mallinnuskielenä Modelicaa ja mallinnusympäristönä Dymolaa sekä MATLABia.

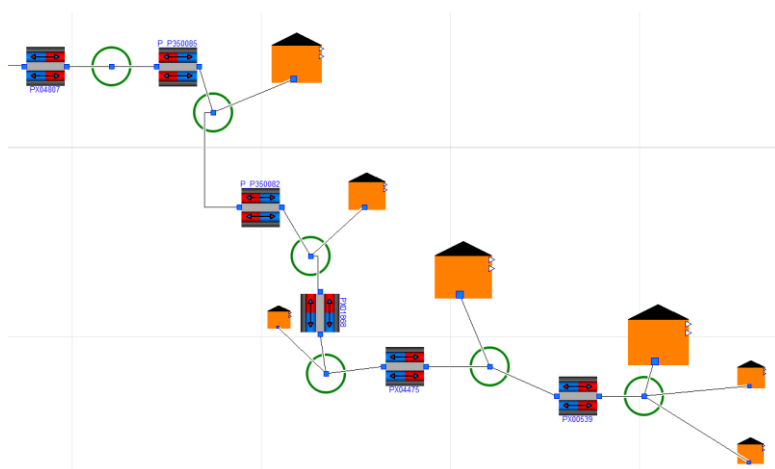
Kaukolämpöverkon laajuuden vuoksi oli tiedossa, ettei ole mahdollista käyttää tehokkaasti manuaalisia mallinnustyökaluja, sillä Luulajan järjestelmässä on erilaisia asiakkaita yli 9 000 ja 44 000 putkea. Näiden lisäksi sensoreita, tuotantolaitoksia ja toimilaitteita eri sijainneissa. Mallintamisessa käytettiin olemassa olevia GIS-tietoja (Geographical information system). Työkalulla pystytään yhdistämään paikkatietoja tietojen ja näin yksinkertaistamaan mallin luontiprosessia. Kuvasta 9 näkee MATLAB:lla luodun verkkomallin. Järjestelmään luotiin lisäksi prosessikaavio jokaiselle komponentille. Näitä olivat putket, lämmönjakohuoneet ja tuotantolaitokset. Komponentit tuotiin vaiheittain järjestelmään ja kategorisoitiin automaattisesti. [26, s. 46.]



Kuva 9. OPTi-Sim-verkkomalli [25, s. 4].

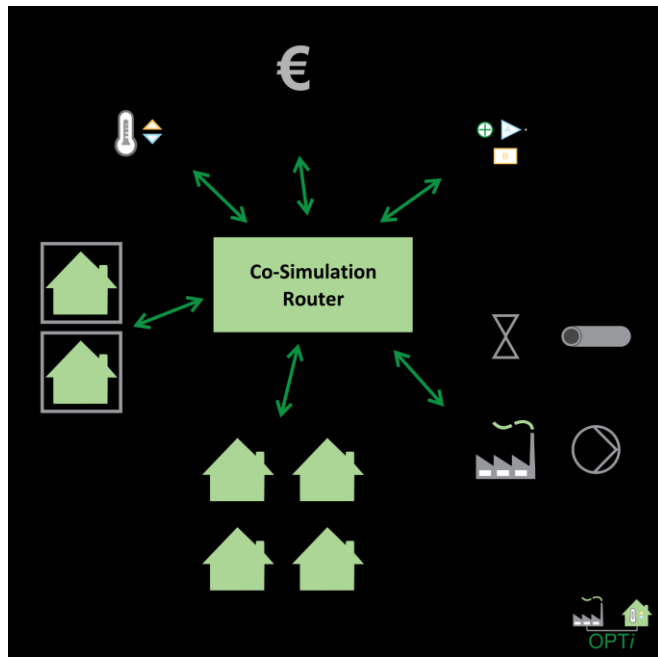
Automaattisessa mallin luonnin yhteydessä tietoja yhdistämällä pystyttiin vähentämään simuloitavia komponentteja merkittävästi. Lähtötilanteessa verkon mallissa oli yli 44 000 putkea ja yli 9 000 kuluttajaa. Tietojen yhdistämisen jälkeen simuloitavia putkia oli jäljellä 3 149 ja kuluttajia 414. Loppujen lopuksi siis simulointitarvetta laskettiin 90 %. [25, s. 3.]

Kaukolämmönjakeluverkoston malli on yksi osa OPTi-Sim-verkkomallia. Putkien ja liitoskohtien mallintamisessa parametreinä käytettiin seuraavia: määrä, lämpötila, virtausvastus, lämpöhäviö ja korkeusero. Simuloitujen pisteiden välillä putkistopaine vaihtelee dynaamisen ja staattisen paineen lainalaisuuksien mukaan. Lämpöhäviö on vakioitu ja siihen vaikuttavat putkessa kulkevan veden lämpötila ja maaperän lämpötila. Lämpötilaviive on arvioitu lämpöjohtumisen mukaan. Mallissa tietopisteitä, jotka on sijoitettu komponenttien välille. Niitä käytetään, kun seurataan putkiston staattista tai dynaamista käyttäytymistä. [25, s. 4.] Kuvassa 10 on esimerkkinä Dymolan luoma graafinen näkymä verkon haarasta. Lämmönjakohuoneiden kulutus kuvataan rakennuksen kokona.



Kuva 10. Verkon haara [25, s. 4].

OPTi-sim pohjautuu TWT co-simulation -kehitysympäristöön, joka hallitsee useita alijärjestelmän simulointeja yhtä aikaa. Järjestelmässä on reititin, joka kokoaa simuloidut tiedot yhdeksi. [25, s. 44.] Kuvassa 11 on esitetty co-simulation-arkkitehtuuri.



Kuva 11. OPTi-sim-arkkitehtuuri [32].

FMI-pohjainen simulointi tarjoaa hyvän lähestymistavan erilaisten mallien simulointiin ja jakamiseen. Järjestelmän heikkoutena on kuitenkin pitkä mallintamisaika. Simulointi tapahtuu 3–4-kertaisella nopeudella todellisuuteen verrattuna, joten pitkien aikajaksojen mallintaminen on aikaa vievä prosessi. Järjestelmän luonteen vuoksi ei ole mahdollista ajaa simulaatiota osa-alueittain. Moniydinprosessorilla ei saavuteta nopeampaa laskenta-aikaa, vaan ainoa ratkaisu olisi nostaa prosessorin kellotaajuutta. [33. s. 141.]

### 5.3 Saavutukset

Luulajan digitaalisessa kaksoosessa oli käytössä neljä eri rakennusta tai rakennuskokonaisuutta pilottikohteina, joita käytettiin validoinnissa sekä pilotoinnissa [34, s. 12]. Taulukossa 2 on esitetty tarkemmat tiedot kohteista.

Taulukko 2. Pilottikohteet [34, s. 12].

	Pinta-ala (m <sup>2</sup> )	Asuntoja	Kulutus (MWh/a)	Kulutus (kWh/m <sup>2</sup> )
<b>Luulajan energian toimistorakennus</b>	6627	0	831	125
<b>Kompanivägen</b>	7038	104	674	96
<b>Smultronstigen</b>	11018	126	1637	149
<b>Maalämpökohde</b>	0	0	605	

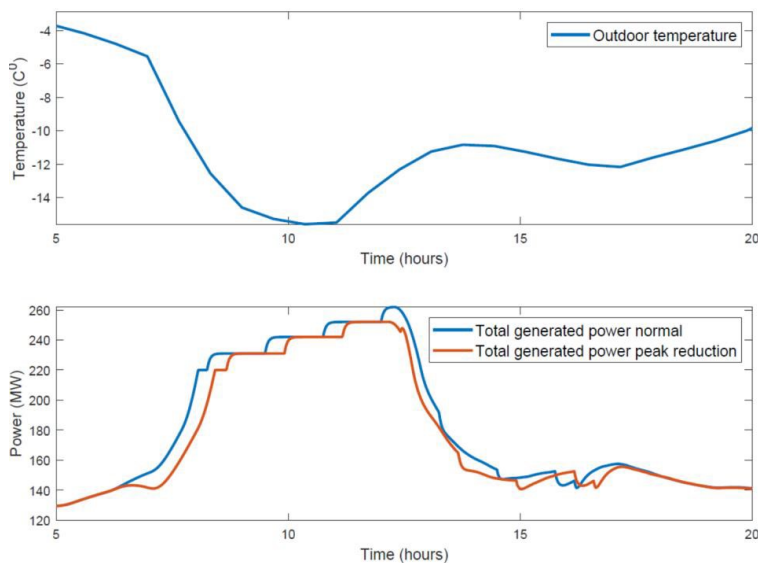
Smultronstigen on vanha rakennuskokonaisuus, jonka lämmitysjärjestelmä on varustettu vanhanaikaisella ohjauksella. Kompanivägen on uusi asuinrakennus älykkäällä lämmitysjärjestelmällä. Luulajan Energian toimistorakennus on varustettu uusimmalla teknologialla, jolla pystytään säätämään huonekohtaisesti lämpötiloja. Maalämpökohde oli mukana lämmönvarastoinnin mahdollisuuden vuoksi, jota käytettiin kulutushuippujen tasoittamisen optimoinnissa. [34, s. 12.]

### 5.3.1 Sisälämpötilan alentamisen simulointi

Yksi projektin tavoite oli selvittää, kuinka paljon pystytään laskemaan rakennuksien sisäilman lämpötilaa tinkimättä käyttäjien mukavuudesta. Tässä tapauksessa pilotointi suoritettiin Luulajan Energian päärakennuksessa. Osa-alueessa tutkittiin sisälämpötilan mukavuusaluetta sekä suoritettiin grey-box-simulaatioita ulkolämpötilan vaikutuksesta sisälämpötilaan ja tämän vaikutuksia rakennuksen energiankäyttöön. Simuloimalla sisälämpötila mukavuusalueen alapäähän pystyttiin havaitsemaan, että yhden asteen lämpötilan keskimääräinen sisälämpötilan alentaminen säästäisi testausaikaan 5 % rakennuksen energiankulutuksesta. Kahden asteen alentaminen siis säästäisi 10 %. Samalla pystyttiin paremmin ymmärtämään rakennuksien käyttäytymistä sääolosuhteiden muuttuessa. [33, s. 118–119.]

### 5.3.2 Kulutushuippujen tasaaminen

Rakennuksien lämpökapasiteettia tutkittiin kulutushuippujen tasaamisen kannalta. Kahdessa pilottikohteessa Luulajan Energian toimistossa ja Smultonstigenin pilottikohteessa ajettiin testejä ja tutkittiin, kuinka pitkään rakennus pystyy olemaan ilman lämpöenergian syöttöä. Smultonstigenin kohteessa suljettiin lämmönsyöttö kuudeksi tunniksi ja havaittiin, että tämä laskee rakennuksen sisälämpötilaa  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Toimistorakennuksessa taas todettiin, että ilmastointijärjestelmän lämmitys alkaa reagoimaan nopeammin. Kahden tunnin testin jälkeen havaittiin, että sisälämpötila laskee alle mukavuusrajan ja testi lopetettiin. Näiden tulosten perusteella pystyttiin tekemään simulointeja aiempien sää- ja käyttötietojen perusteella (kuva 12). Samalla arvioitiin, että lämpökapasiteetin palautuminen vaatii kaksinkertaisen ajan, verrattuna lämmittämättömään ajanjaksoon. [33, s. 82–84.]



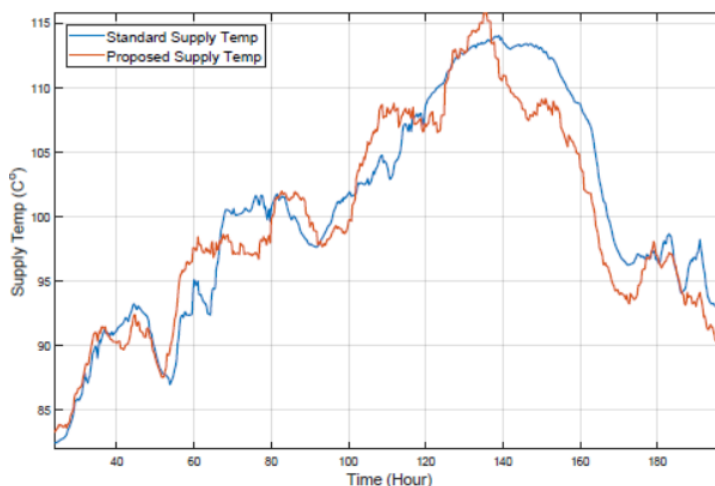
Kuva 12. Kulutushuippusimulointeja [33, s. 84].

Simulointien avulla pystyttiin arvioimaan lämmityksen tuotannon käyttäytymistä kulutushuippujen tasaamisessa, kuten mikä on lämpölaitoksien käynnistämistarve ja miten sen vaikuttaa verkkoon. Testiajanjaksona pystyttiin vähentämään energiantuotantoa 77 MWh. Kulutushuippujen tasaamisella myös

pystyttiin optimoimaan polttoaineiden käyttäminen kustannustehokkaasti ja ympäristöystävällisesti. [33, s. 77–84.]

### 5.3.3 Energiamäärän alentaminen

Ohjausjärjestelmä, joka hyödyntää esilämmitystä ja esiviilennyksen tarvitsee sääennusteisiin perustuvaa kulutuksen ennakkointia. Tätä varten projektissa kehitettiin OPTi-forecast-sovellus, joka luo sääennusteisiin ja verkon lämpökapasiteettiin perustuvaa ennakoivaa lämpötilakäyrää. Lähtötavoitteena oli alentaa järjestelmän keskimääräistä lämpötilaa 2 °C ja ennustaa verkon tarve kuusi tuntia eteenpäin. [33, s. 89.] Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty kahden eri tilanteen simuloidut kulutuskäyrät kahdeksan päivän aikajaksolta. Punainen on OPTi-forecastilla simuloitu lämpötilakäyrä.



Kuva 13. Käytössä oleva sekä ehdotettu käyrä [33, s. 89].

Simuloimalla saatiin tuloksia, joiden perusteella pystytään päättämään, että verkon lämpötilaa on mahdollista laskea 1,25 °C. Tällä saavutettaisiin vuositasolla arviolta 13 GWh:n säästöt, joka on Luulajan mittakaavassa 1,6–2 % kokonaiskulutuksesta. [33, s. 88–90.]

### 5.3.4 Järjestelmän ohjaus

Ohjausjärjestelmän konfigurointi on tärkeä osa kaukolämpöverkon toimintaa. Isoissa kaukolämpöverkoissa on yleistä lämpötilan ja pumppaustehon heilahtelu, joka on osittain seurausta ohjausparametreistä. Simuloinnilla pystyttiin testaamaan ohjausjärjestelmän toimivuutta kaukolämpöverkossa. OPTi-Sim-mallissa on käytössä Model Predictive Control (MPC) - ohjausjärjestelmä, jota testattiin simuloinnissa tyydyttävien tulosten ja näin pystyttiin määrittämään ohjausparametrit, joilla vältetään paineen ja lämpötilan heilahtelu lämmöntuotannon eri tilanteissa. MPC-ohjaintiedot perustuu digitaalisen kaksosen, ympäristön ja ohjattavan järjestelmän tietoihin. Tässä tapauksessa ohjattava järjestelmä oli tuotantolaitos. Huojunnan vähentämisellä ei ole suoranaisia vaikutuksia tehokkuuttaan, mutta on osaltaan vaikuttamassa järjestelmän käyttöikään ja komponenttien vähemmän kuluttavaan käyttöön. [33, s. 97.]

## 6 Päätelmät

Kaukolämpöverkon digitaalinen kaksonen luo uudenlaisen toiminnallisuuden laajan verkon ohjaamiseen. On mahdotonta esittää suoria hyötyjä ilman syvempää tutkimustyötä, jossa huomioidaan Vantaan kaukolämpöverkon ominaispiirteet. Kuitenkin vastaavia hankkeita on toteutettu, kuten tässä työssä esitelty Luulajan OPTi-Sim-projekti, joista voidaan tehdä päätelmiä digitaalisen kaksosen eduista. Yhtä lailla näistä projekteista pystytään kartoittamaan haasteita ja alueita, jotka vaativat erityistä tarkastelua. Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla niitä potentiaalisia hyötyjä, joita digitaalinen kaksonen toisi mukanaan. On huomioitava, että mallin tuottaminen ja sen ylläpitäminen edellyttää myös kulttuurinmuutosta yrityksessä ja uusien toimintatapojen sekä ohjeistuksien luomista.



## 6.1 Mallin luominen

Vantaan Kaukolämpöverkosta on olemassa Trimble NIS -ohjelmalla luotu staattinen malli. Trimble NIS tarjoaa mahdollisuuden luoda digitaalinen kaksonen verkosta, kuitenkin ohjelmistoyrityksen sivuilla ominaisuudet tuntuvat rajoittuvan verkkolaskentaan, mallien analyysiin sekä tukemaan suunnittelua. Ohjelmistolla pystytään simuloimaan verkon lämpötilaa ja painetta, mutta rakennuksien energiantarpeen ennakkointiin Trimble ei ainakaan tällä hetkellä tarjoa sovellusta. [35]

Vantaan kaupunki on mukana Helsinki Region Infoshare (HRI) -hankkeessa, jossa on tarkoitus jakaa pääkaupunkiseudun eri toimialojen tietoja avoimesti yhdessä palvelussa. Julkisen aineiston tarjoamiseen osallistuu kaikki kaupungin toimialat. Rakennuksista on saatavilla hyvin kattavasti paikkatietoja ja metadataa rakennuksien ominaisuuksista, kuten lämmitysmuodosta, rakennusvuodesta, rakennusala tai rakennusmateriaalista. Lisäksi Vantaan kaupungin omistamista rakennuksista on saatavilla veden ja energian kulutustietoja. [36] Esimerkkinä saatavilla olevista paikkatiedoista on seuraava kartta (kuva 14), joka on luotu QGIS-ohjelmalla. Karttaan on seulottu Vantaan rakennuskanta, jonka lämmitysmuotona on kaukolämpö.



Kuva 14. Kaukolämmitteiset rakennukset [37].

Mallin luomisessa pystytään halutessa hyödyntämään Vantaan Energian verkkomallia pohjana digitaaliselle kaksooselle. Myös Vantaan avoin rakennuskannan paikkatietodata ja CityGML-muodossa oleva rakennuskartta voi olla hyödyllinen mallin luonnissa tai rakennuskannan kategorisoinnissa. Luonnollinen kategorisointi voisi olla rakennuksen käyttötarkoitus, rakennusvuosi, rakennusmateriaali tai näiden yhdistelmä.

Jos halutaan luoda digitaalinen kaksonen, jossa jokaisesta lämmönjakohuoneesta ja rakennuskokonaisuuden käyttäytymisestä on oma simulaatio. Tähän tulisi käyttää tarkoituksenmukaista ohjelmaa, jolla voidaan muodostaa rakennuksen lämmitystarvetta noudattava algoritmi lähtötietojen perusteella tai käyttödatan ja lähtötietojen yhdistelmällä. Luulajan esimerkin perusteella on mahdollista, että massiivista anturointia ei välttämättä ole tarvetta suorittaa, vaan pilottirakennuksilla pystytään todentamaan, noudattaako malli todellisia tilanteita.

Vantaan Energian on harkittava mallinnuksen tarkkuuden tarvetta ja mihin mallia tullaan käyttämään. Eri ohjelmistoilla on mahdollista luoda hyvin tarkkoja malleja, jotka noudattavat tarkasti vallitsevaa ympäristöä. Ratkaistava on, onko se tarkoituksenmukaista tai kustannustehokasta. Mielenkiintoinen tutkimuskohde olisi auringon säteilyn määrän, maaperän lämpötilan, lumipeitteen paksuuden ja tuulitietojen lisääminen sääolosuhteiden seurantaan ja niiden vaikutuksien simuloiminen.

## 6.2 Käyttödatan kerääminen

Vantaan Energia kerää asiakkaidensa kulutusdataa jatkuvasti ja kaikki kaukolämpöverkon lämmönjakohuoneet ovat etäseurattavia. Seurantatietoa saadaan tunnin resoluutiolla ja energiayhtiö saa käyttödatan kerran vuorokaudessa [8]. Rakennuskohtaista kulutusdataa on näin ollen hyvin saatavilla. Dynaamisen mallin luomisessa olisi syytä perehtyä siihen, mikä olisi riittävä aikaresoluutio, jotta malli saataisiin mukailemaan tarkasti fyysisen verkon käyttäytymistä eri tilanteissa.

Uusien rakennuksien myötä sekä olemassa olevan rakennuskannan korjaushankkeissa taloihin lisätään ainakin alkeellista taloautomaatiota. Tämän myötä talotekniikan seurannasta ja sisätilojen laadusta saadaan jatkuvasti enemmän käyttötietoja. Nämä talot ovat usein myös etäseurannassa, joten on jo nyt olemassa kohteita, joista mahdollisesti tiedetään tulevien tuntien lämmitysenergian tarve ja jonka etäluennasta on olemassa rajapinta. Vantaan Energialle voisi olla suuria hyötyjä tästä rajapinnasta kaukolämpöverkon mallin validoinnissa ja pilotoinnissa. Se, onko mielekästä anturoida usean toimijan puolesta rakennuksia ja mitata samoja parametreja, on asia, jota olisi syytä tarkastella kaukolämpöverkon kehittyessä. Yhtenä vaihtoehtona voisi esimerkiksi olla yhteistyö Vantaan kaupungin asuntojen ja julkisien rakennuksien taloautomaatiosta vastaavien tahojen kanssa.

Rakennuskannan ominaisuustietojen saavuttaminen on eräs mallintamisen haasteista. Kuinka saadaan tuotua riittävästi tietoa rakennuksien ominaisuuksista, jotta on mahdollista luoda fysikaalisia ominaisuuksia vastaava malli? Rakennuksien ominaisuuksia tarkastellaan ja tutkitaan esimerkiksi energiakatselmuksien yhteydessä, joita on vaadittu yrityksiltä neljän vuoden välein, jos henkilöstömäärä ylittää 250 henkeä. Kiinteistöistä myös vaaditaan lain mukaan energiatehokkuustodistus myynnin vai vuokraamisen yhteydessä. Tosin todellisuudessa näitä harvoin on laadittu, vaikka laki näin edellyttäisi. Energiatehokkuusluku ei itsessään kerro rakennuksen energiankulutuksesta, mutta laskennassa käytetään lähtötietoja, jotka auttavat rakennuksen fysikaalisten ominaisuustietojen määrittämisessä. Muun muassa rakennuksen lämpökuormat, ikkunoista sisään tuleva auringon lämpöenergia tai rakennuksen ilmanpitävyys voivat olla tarpeellisia lähtötietoja digitaalista kaksosta luodessa. Tarvittavaa helposti saatavilla olevaa lähtötietoa rakennuksista on olemassa jo Vantaan Energian asiakastiedoissa sekä avoimesti saatavilla HFI-palvelussa. Jo näiden tietojen perusteella voidaan todennäköisesti luoda riittävän luotettava malli kaukolämpöverkon optimointiin.

### 6.3 Hyödyt

Digitaalista kaksosta on mahdollista soveltaa laajasti ja siitä voidaan saada hyötyä Vantaan Energian mittavakaavassa hyvin usealla eri tavalla. Jo pelkästään se, että kaukolämpöverkon tiedot sijaitsisivat yhdessä järjestelmässä, jota voitaisiin käyttää suunnittelussa, huollossa, simuloinnissa tai vaikkapa tietojen viennissä kaupungin lupaprosesseihin yksinkertaistaisi, sujuvoittaisi yhtiön päivittäisiä toimintoja.

Riippuen digitaalisen kaksosen mallintamisen laajuudesta yksi saavutettava hyöty olisi lämmönjakohuoneiden uudelleenmitoittamisen mahdollisuus. Esimerkiksi eräässä opinnäytetyössä tutkittiin Helenin kaukolämpöverkon mitoituskäytäntöjä ja huomattiin, että lämmönsiirtimet ovat usein ylimitoitettuja [38]. Jos malli tuotetaan vastaamaan myös tarkasti lämmönjakohuoneiden toimintaa, pystytään luomaan uusi tarkempi laskentamalli lämmönsiirtilin mitoittamiseen, jotta se saadaan vastaamaan talon ominaisuuksia nykyistä tehokkaammin.

Kun vertaa Vantaan Energian tuotantolukuja Luulajassa saavutettuihin hyötyihin, olisi esimerkiksi vuotuinen energiantuotannon säästö verkon lämpötilan alentamisella 27 GWh, jos saavutettaisiin esimerkiksi 1,5 %:n polttoainetarpeen alentaminen. Se, mitkä olisivat Vantaan Energian kokonaishyödyt, selviää vain laajalla tutkimustyöllä, mutta todennäköistä on, että hyödyt voivat olla merkittävät. Kokonaiskulutuksen laskiessa samalla tietenkin Vantaan Energian hiilidioksidipäästöt vähenevät. Järjestelmällä myös voitaisiin vaikuttaa kulutushuippuihin sekä tavoitella kysyntäjouston tarpeita, jotka osaltaan olisivat vaikuttamassa taloudellisiin hyötyihin sekä edesauttaisivat Vantaan Energiaa saavuttamaan ympäristötavoitteitaan.

## 7 Yhteenveto

Tässä työssä luotiin katsaus rakennuksien energiankulutukseen vaikuttaviin tekijöihin, kaukolämpöverkkoihin sekä tuotemallintamisen uusimpaan trendiin eli

digitaalisiin kaksosiin. Työn tavoitteena oli laatia Vantaan Energian tarpeisiin selvitys digitaalisen kaksosen tuomista mahdollisuuksista kaukolämpöverkon optimoinnissa ja verkon menolämpötilan säätämisessä. Tämän lisäksi työssä tarkasteltiin järjestelmän luonnin edellytyksiä saatavilla olevien tietojen perusteella.

Työn tekijälle aihe oli mielenkiintoinen ja hyödyllinen lisä ympäristötekniikan opintoihin. Työn myötä kasvoi laajempi ymmärrys rakennuksien energiakäyttäytymisestä sekä tuotemallintamisen tekniikoista. Haasteita tuotti entuudestaan kohtalaisen vieras aihe, jonka vuoksi insinööriyön alkuvaiheessa oli vaikeuksia hahmottaa, mistä materiaalista on työn kannalta hyötyä ja kuinka luoda järkevä hyödyllinen kokonaisuus, joka on rajattu niin, ettei tärkeää informaatiota jää työn ulkopuolelle.

Työstä muodostui kokonaisuus, joka luo läpileikkauksen käsiteltävään aiheeseen. Koska tuotemallintaminen on kattavasti tutkittu aihe, on materiaalia olemassa laajasti. Toisaalta kaukolämpöverkkojen digitaalisten kaksosten osalta tietoa oli ajoittain haastavaa löytää. Tässä suureksi hyödyksi osoittautui Luulajan yliopiston ja Luleå Energi Ab:n projektin kattava dokumentointi.

Digitaalisten kaksosten käyttömahdollisuuksissa vaikuttaa olevan taivas rajana. Tässä työssä keskityttiin vain jo luotuihin järjestelmiin ja mahdollisuuksiin. Toisena näkökulmana olisi voinut olla innovatiivisempi näkökulma aiheeseen, jossa olisi pohdittu kaikkia potentiaalisia mahdollisuuksia. Tämä olisi kuitenkin vaatinut aiempaa aihealueen syvempää osaamista. Joka tapauksessa on osoitettavissa, että mallintamisella ja simulaatiolla pystytään saavuttamaan uusi näkökulma kaukolämpöverkon optimoimiseen ja että sillä voi olla merkittäviä hyötyjä, niin taloudellisesta kuin ekologisestakin näkökulmasta.

## Lähteet

- 1 Kaukolämpö. Verkkoaineisto. Motiva.  
<[https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelmän\\_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelmän_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo)>. Päivitetty 26.3.2019. Luettu 22.3.2021.
- 2 Tilinpäätös ja toimintakertomus 2019. 2020. Verkkojulkaisu. Vantaan Energia Oy. <<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/vantaanenergia/uploads/20200421135740/VE-tilinp%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s-2019-FINAL-kotisivuille.pdf>>. Luettu 22.3.2021.
- 3 Energiavuosi 2020. 2021. Verkkoaineisto. Energiateollisuus.  
<[https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2020\\_nettil\\_kj\\_paivitetty\\_20210318.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2020_nettil_kj_paivitetty_20210318.pdf)>. Päivitetty 18.3.2021. Luettu 22.3.2021.
- 4 Lämpöä kotiin keskitetysti. Verkkoaineisto. Motiva.  
<[https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa\\_kotiin\\_keskitetysti\\_Kaukolampo.pdf](https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa_kotiin_keskitetysti_Kaukolampo.pdf)>. Luettu 23.3.2021
- 5 Mäkelä, Veli-Matti; Tuunanen, Jarmo. 2015. Suomalainen kaukolämmitys. Mikkeli: Mikkelin ammattikorkeakoulu.
- 6 Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km. Verkkoaineisto. Energiateollisuus.  
<<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>>. Luettu 1.4.2021
- 7 Koskelainen, Lasse; Saarela, Rauli & Sipilä, Kari. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus.
- 8 Penttinen, Petri. 2021. Kehityspäällikkö, Vantaan Energia Oy. Vantaa. Haastattelu. 15.4.2021.
- 9 Junnila, Seppo; Kontu, Kaisa; Penttinen Petri & Vimpari, Jussi. 2021. How to Promote Local District Heat Production Through Real Estate Investments. Verkkoaineisto. Aalto Yliopisto.  
<<http://www.sdewes.org/jsdewes/pid8.0343>>. Luettu 17.3.2021.
- 10 Kaukolämpötilasto 2019. 2020. Verkkoaineisto. Energiateollisuus.  
<[https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto\\_2019.pdf](https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto_2019.pdf)>. Luettu 18.3.2021.
- 11 Penttinen, Petri. 2021. Kehityspäällikkö, Vantaan Energia Oy. Vantaa. Sähköposti. 22.4.2021.
- 12 Palvelukansio. Verkkoaineisto. Nomasi Oy.  
<[https://www.palvelukansio.fi/edit?target=2&id=0&skip\\_to\\_order=2](https://www.palvelukansio.fi/edit?target=2&id=0&skip_to_order=2)>. Luettu 26.4.2021

- 13 Kortesmäki, Tero. Kaukolämpöverkon suunnittelu ja dokumentointi Vantaan Energialle. Insinööritoimisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 14 Rakentaminen ja rakennukset. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/rakentaminen\\_ja\\_rakennukset](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset)>. Päivitetty 10.8.2020. Luettu 13.4.2021.
- 15 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehon laskenta, ohjeet. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma, Energiatehokkuus. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 16 Taloautomaation perusteet. Verkkoaineisto. Motiva. <[https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/taloyhtiöt/taloautomaatio\\_suurissa\\_asuinrakennuksissa/taloautomaation\\_perusteet](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiöt/taloautomaatio_suurissa_asuinrakennuksissa/taloautomaation_perusteet)>. Päivitetty 7.12.2020. Luettu 23.4.2021
- 17 KNX-tekniikka. Verkkoaineisto. KNX-Finland. <<https://knx.fi/index.php?k=224571>>. Luettu 23.4.2021.
- 18 Tiilikainen, Sami. 2020. Rakennusautomaatiojärjestelmät. Luentomoniste. Savonia-ammattikorkeakoulu.
- 19 Kivitalojen energiatehokkuus. 2010. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23667/Kivitalojen%20energiatehokkuus.pdf>>. Luettu 23.4.2021.
- 20 Saari, Mikko & Laine, Juhani. 2009. Passiivienergiatalo harkoista – LVI-tekniikan ratkaisumallit ja suunnitteluohje. Verkkoaineisto. VTT. <[http://kivitalo.asiakkaat.sigmatic.fi/core/wp-content/images/2012/06/vtt-r-08496-09\\_passiivienergiatalo\\_harkoista\\_lvi-ohje\\_2009\\_rakennesuunnittelu.pdf](http://kivitalo.asiakkaat.sigmatic.fi/core/wp-content/images/2012/06/vtt-r-08496-09_passiivienergiatalo_harkoista_lvi-ohje_2009_rakennesuunnittelu.pdf)>. Luettu 23.4.2021.
- 21 Digitaalinen kaksonen tulkitsee todellisuutta ja tehostaa toimintaa – älykkään mallinnuksen avulla säästetään aikaa ja rahaa. 2020. Verkkoaineisto. LUT. <[https://www.lut.fi/uutiset/-/asset\\_publisher/h33vOeufOQWn/content/digitaalinen-kaksonen-tulkitsee-todellisuutta-ja-tehostaa-toimintaa-%E2%80%93-älykkään-mallinnuksen-avulla-saastetaan-aikaa-ja-rahaa](https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/digitaalinen-kaksonen-tulkitsee-todellisuutta-ja-tehostaa-toimintaa-%E2%80%93-älykkään-mallinnuksen-avulla-saastetaan-aikaa-ja-rahaa)>. Luettu 2.4.2021.
- 22 Singapore experiments with its digital twin to improve city life. Liceras Patricia. 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.smartcitylab.com/blog/digital-transformation/singapore-experiments-with-its-digital-twin-to-improve-city-life/>>. Luettu 2.4.2021
- 23 Freas, Ben & Woods, Eric. 2019. Creating Zero Carbon Communities: The Role of Digital Twins Digital-twin-white-papers. Verkkoaineisto. Navigant Research. <<https://learn.iesve.com/digital-twin-white-paper/>>. Luettu 23.3.2021.

- 24 MATLAB. Verkkoaineisto. MathWorks.  
<<https://se.mathworks.com/products/matlab.html>>. Luettu 26.4.2021
- 25 Atta, Khalid Tourkey; Birk, Wolfgang; Schweiger, Gerald & Simonsson, Johan 2021. Experiences from City-Scale Simulation of Thermal Grids. Verkkoaineisto. MDPI. < <https://www.mdpi.com/2079-9276/10/2/10>>. Luettu 15.4.2021.
- 26 Lingman, Peter. 2018. D4.3: Dynamical physical system modelling. Verkkoaineisto. OPTi-Sim. < <http://www.opti2020.eu/documents/project-reports/wp-4-system-modelling-and-virtualization/>>. Luettu 21.3.2021.
- 27 Kartta.vantaa. Paikkatietopalvelu. Vantaan kaupunki.  
<<https://kartta.vantaa.fi/>>. Luettu 7.5.2021
- 28 Farsi, Maryam; Daneshkhah, Alireza; Hosseini-Far, Amin & Jahankhani, Hamid. 2020. Digital Twin Technologies and Smart Cities. E-kirja. Springer Nature Switzerland AG.
- 29 About. Verkkoaineisto. OPTi-Sim. <<http://www.opti2020.eu/>>. Luettu 21.4.2021.
- 30 Birk, Wolfgang; Chandan, Vikas; Linder, Nicklas; Lingman, Peter; Odefey, Ulrich & Ritter, Yvonne. 2016. OPTi-Sim: Co-simulation based virtualization of large scale DHC-networks. Verkkoaineisto. <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1059738/FULLTEXT01.pdf>>. Luettu 2.4.2021.
- 31 Luleå Pilot. Verkkoaineisto. OPTi. <<http://www.opti2020.eu/pilots/lulea-pilot/>>. Luettu 21.4.2021.
- 32 OPTi Sim. Verkkoaineisto. OPTi-Sim. <<http://www.opti2020.eu/opti-framework/opti-sim/>>. Luettu 22.4.2021.
- 33 Saurav, Kumar. 2018. D6.3: Test Report (Ver. 2). Verkkoaineisto. <<http://www.opti2020.eu/wp-content/uploads/2019/07/D6.3-Test-report-Ver-2.pdf>>. Luettu 25.4.2021.
- 34 Sundberg, Håkan. 2017. D6.1: Integration and validation. Verkkoaineisto. <<http://www.opti2020.eu/wp-content/uploads/2019/07/D6.1-Integration-and-validation-plan.pdf>>. Luettu 25.4.2021.
- 35 Kaukolämpö. Verkkoaineisto. Trimble.  
<<https://utilities.trimble.fi/kaukolampo.html>>. Luettu 27.4.2021
- 36 Avoin data. Verkkoaineisto. Vantaa.  
<[https://www.vantaa.fi/hallinto\\_ja\\_talous/tietoa\\_vantaasta/avoin\\_data](https://www.vantaa.fi/hallinto_ja_talous/tietoa_vantaasta/avoin_data)>. Luettu 27.4.2021.
- 37 Vantaan Rakennukset. Verkkoaineisto. Helsinki Regional Infoshare.  
<<https://hri.fi/data/fi/dataset/vantaan-rakennukset>>. Luettu 10.4.2021.



- 38 Kangasmaa, Linda. 2019. Mittausdatan käyttö kaukolämmitteisten asuinrakennusten lämpimän käyttövesisiirtimen mitoituksen optimoinnissa. Opinnäytetyö. Arcada. Theseus-tietokanta.