

Eero Piipari

SÄÄENNUSTEEN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNUSTEN ENERGIAKUSTANNUS- TEN OPTIMOINNISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yrjö Majanne
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Eero Piipari: Sääennusteen hyödyntäminen rakennusten energiakustannusten optimoinnissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2022

Tämän työn tarkoituksena on selvittää, voiko sääennustetta hyödyntää rakennusautomaation osana rakennuksen energiankulutuksen optimoinnissa. Kulutuksen vähentäminen on tärkeää, sillä siitä syntyy rahallisia säästöjä ja myös vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tämä energiasäästö perustuisi rakennuksen lämmittämiseen optimaalisella hetkellä. Työssä selvitetään rakennuksen dynamiikkaa ja miten sää vaikuttaa siihen. Lisäksi tutustutaan malliprediktiviseen säätöön.

Tässä työssä muodostetaan rakennuksen dynaaminen malli. Muodostettuun malliin suunnitellaan mallipredikttiivinen säädin (engl. Model Predictive Control). Mallipredikttiivinen säätö on säätötapa, jossa säädin laskee tiedossa olevien perusteella prosessille optimaalisen ohjauksen, joka minimoi säätäjän kustannusfunktiossa määritellyt kustannukset parametrien painoarvojen mukaan. Sääennuste liitetään osaksi tätä mallipredikttiivistä säätöä. Tässä työssä sääennusteena toimii todellinen säätötiladata, joten työssä ei oteta sääennusteen epävarmuutta huomioon. MPC-säätö antaa rakennuksen sisälämpötilan vaihdella lämmittämällä rakennusta eniten otollisella hetkellä perustuen sääennusteeseen. Säädin suunnitellaan käyttämällä Matlabin MPC työkalua.

Säätöä testataan simuloimalla sitä Simulinkissä. Saatuja tuloksia MPC-säädöstä verrataan simulointituloksiin, jotka on saatu perinteisellä säätömenetelmällä eli PI-säädöllä. Tulosten vertailussa on huomattavissa selkeitä eroja siinä, miten säädöt käyttäytyvät. Työn tulosten mukaan MPC-säätöä käyttämällä saadaan aikaan pieni säästö energiankulutuksessa. Tästä saatavan rahallisen säästön lisäksi MPC-säätö ei synnytä lämmitystehoon piikkejä, jonka ansiosta pystytään säästämään kaukolämpömaksuissa.

Tuloksien perusteella sääennusteen liittämällä osaksi säätöä on mahdollista saada hyötyjä aikaan. Saadut tulokset tarvitsevat kuitenkin lisää tutkimusta, että menetelmän lopullinen tehokkuus saadaan selville. Aihe vaatii myös lisää tutkimusta, sillä tässä työssä ei paneuduttu tiettyihin oleellisiin sääennusteen ja MPC-säädön elementteihin, kuten sääennusteen epävarmuuden vaikuttamista MPC-säätöön.

Avainsanat: rakennusautomaatio, energiankulutus, sääennustus, MPC

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RAKENNUS JA ENERGIANHALLINTA.....	2
2.1 Rakennuksen järjestelmät.....	2
2.2 Energiankulutus rakennuksessa.....	3
2.3 Rakennuksen dynamiikka	4
3. PID- JA MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄDIN	6
3.1 PID-säädin	6
3.2 Malliprediktiivinen säädin	7
4. RAKENNUKSEN DYNAMIIKAN MALLINTAMINEN	10
4.1 Mallin rakenne.....	10
4.2 Mallin parametrit ja simulaatioskenaario.....	12
4.3 Mallin simulointi.....	15
5. SÄÄDÖN OPTIMOINTI	20
5.1 Malliprediktiivisen säädön rakentaminen.....	20
5.2 Simulointi MPC-säädön kanssa.....	22
6. TULOSTEN VERTAILU	27
7. YHTEENVETO.....	30
LÄHTEET	31
LIITE A: SIMULINK-MALLI	33
LIITE B: SIMULINK-MALLI MPC	34

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Rakennuksen energiankulutusjakauma [8].....</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>Ulkolämpötilan vaikutus energiankulutukseen.....</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Lohkokaavio suljetusta systeemistä, joka sisältää PID-säätimen, muokattu lähteen mukaan [15, s. 294]</i>	<i>6</i>
Kuva 4.	<i>MPC:n toimintaperiaate, kuva lähteestä [16, s. 3]</i>	<i>8</i>
Kuva 5.	<i>MPC:n yleinen rakenne, muokattu lähteen pohjalta [16, s. 4].....</i>	<i>9</i>
Kuva 6.	<i>Kuvakaappaus rakennuksen Simulink-mallista.....</i>	<i>10</i>
Kuva 7.	<i>Simuloinnissa käytetty säädädata, muokattu lähteestä [17]</i>	<i>13</i>
Kuva 8.	<i>Simuloinnissa käytetty lämpökäyrä, muokattu lähteestä [13].....</i>	<i>14</i>
Kuva 9.	<i>Rakennuksen lämpöverkon PI-säädöllä lämpötila ajan funktiona</i>	<i>16</i>
Kuva 10.	<i>Kaukolämmön lämmitysteho PI-säädöllä ajan funktiona.....</i>	<i>17</i>
Kuva 11.	<i>PI-säädöllä kulunut lämmitysenergia kumulatiivisena käyränä</i>	<i>17</i>
Kuva 12.	<i>PI-säädöllä rakennuksen sisälämpötila ajan funktiona</i>	<i>18</i>
Kuva 13.	<i>Rakennuksen lämmityksen ja lämpöhäviön tehot PI-säädöllä ajan funktiona</i>	<i>18</i>
Kuva 14.	<i>Tarkennettu otos kuvasta 14</i>	<i>19</i>
Kuva 15.	<i>Simulink-malli malliprediktiivisen säädön muodostamiseen.....</i>	<i>20</i>
Kuva 16.	<i>Kuvankaappaus säätimen rakenteesta</i>	<i>21</i>
Kuva 17.	<i>Lämpöverkon lämpötila MPC-säädöllä ajan funktiona</i>	<i>23</i>
Kuva 18.	<i>Kaukolämmön lämmitysteho MPC-säädöllä ajan funktiona</i>	<i>23</i>
Kuva 19.	<i>MPC-säädöllä kulunut lämmitysenergia kumulatiivisena käyränä.....</i>	<i>24</i>
Kuva 20.	<i>Rakennuksen sisälämpötila MPC-säädöllä ajan funktiona</i>	<i>25</i>
Kuva 21.	<i>Rakennuksen lämmityksen ja lämpöhäviön tehot MPC-säädöllä ajan funktiona</i>	<i>25</i>
Kuva 22.	<i>Tarkennettu kuvasta 23.....</i>	<i>26</i>
Kuva 23.	<i>Kaukolämmön tehon vertailu.....</i>	<i>27</i>
Kuva 24.	<i>Lämpöverkon lämpötilan vertailu.....</i>	<i>28</i>
Kuva 25.	<i>Rakennuksen lämpötilan vertailu</i>	<i>29</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	<i>Tilamallin dynamiikkamatriisi</i>
B	<i>Tilamallin ohjausmatriisi</i>
C	<i>Tilamallin mittausmatriisi</i>
D	<i>Tilamallin suoravaikutusmatriisi</i>
E	<i>Energia</i>
c	<i>Ominaislämpökapasiteetti</i>
C	<i>Lämpökapasiteetti</i>
G	<i>Lämmönjohtavuus</i>
T	<i>Lämpötila</i>
m	<i>Massa</i>
u	<i>Säätösuure</i>
e	<i>Erosuure</i>
y	<i>Ulostulo</i>
r	<i>Asetusarvo</i>
\dot{Q}	<i>Lämmönsiirtokerroin</i>
A	<i>Pinta-ala</i>
k_p	<i>Proportionaalivahvistus</i>
k_i	<i>Integraalivahvistus</i>
k_d	<i>Derivointivahvistus</i>
T_s	<i>Näytteenottoväli</i>
N	<i>Ennustehorisontti</i>
m	<i>Säätöhorisontti</i>
LVI	<i>Lämmitys, Vesi, Ilmastointi</i>
RAU	<i>Rakennusautomaatio</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
PID	<i>Proportionaali Integraali Derivoiva</i>

1. JOHDANTO

Suomessa vuositasolla lämmityksen osuus asumisen hiilijalanjäljestä on suurin (49 %) [1, s. 36]. Vallitseva säätila on määrittävä tekijä siihen, paljonko lämmitystehoa tarvitaan. Täten säällä on suora vaikutus, miten rakennusten energiakustannukset muodostuvat. Tämä on merkittävä tosiasia, koska lähes viidesosa taloyhtiöiden kuluista syntyy lämmityksestä [2]. Lisäksi yhteiskunnassa tavoitteena on siirtyä kohti vihreämpää sekä ekologisempaa suuntaa ja rakennusten energiankulutus on tässä merkittävä tekijä.

Rakennusten lämmitystä ohjaa rakennusautomaatiojärjestelmä, jonka tavoitteena on ylläpitää rakennuksen sisälämpötilaa sille asetetussa asetusarvossaan. Ulkolämpötilan laskiessa, järjestelmä lisää tehoa ja lämpötilan noustessa se laskee tehoa. Lämpötilan tippuessa hetkellisesti, esimerkiksi yön yli, voi järjestelmään syntyä ongelma, jolloin automaatio reagoi lämpötilamuutokseen lämmittämällä rakennusta liikaa. Tämä on tarpeeton toimenpide, joka lisää rakennuksen energiankulutusta. [3]

Tässä tutkimuksessa on tarkoitus perehtyä siihen, miten rakennus käyttäytyy sääolosuhteiden vaihdellessa ja miten sääennusteita hyödyntämällä voidaan vähentää rakennuksen energiankulutusta. Tavoitteena on löytää keinoja, joilla sääennusteita voidaan hyödyntää osana rakennusautomaatiojärjestelmää energiakustannusten vähentämiseksi.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Miten sää vaikuttaa rakennusten energiankulutukseen?
2. Mitkä ovat sääennusteiden hyödyntämismahdollisuudet energiakustannusten minimoinnissa?

Työn kirjallinen osuus koostuu viidestä osasta. Toisessa ja kolmannessa luvussa annetaan teoreettinen pohja työssä käsiteltäville asioille. Tämän jälkeen neljännessä luvussa muodostetaan rakennuksen rakennukselle dynaaminen malli ja simuloidaan sitä. Seuraavassa kappaleessa rakennetaan malliprediktiivinen säätö lämmitykselle ja suoritetaan sen simulointi. Simulointien jälkeen suoritetaan simulointien tulosten vertailu. Työn päätetään yhteenvetoon, joka sisältää pohdintaa työstä ja mahdollisia jatkokehitysideoita.

2. RAKENNUS JA ENERGIANHALLINTA

Tässä kappaleessa esitellään rakennuksessa olevia järjestelmiä ja käydään läpi, miten rakennuksessa kuluu energiaa. Lisäksi tutustutaan rakennuksen dynamiikkaan.

2.1 Rakennuksen järjestelmät

Nykypäivän rakennuksissa on monia erillisiä laitteita ja järjestelmiä. Koska näitä voi olla hankala hallita yksitellen, hankitaan rakennuksiin lähes poikkeuksetta rakentamisen yhteydessä rakennusautomaatiojärjestelmä (RAU). Tämä järjestelmä yhdistää erilliset rakennuksen järjestelmät yhdeksi isoksi kokonaisuudeksi, joka on helposti hallittavissa. Lisäksi nykyään on trendinä, että rakennuksia on mahdollista etäohjata ja -tarkkailla internetin välityksellä.

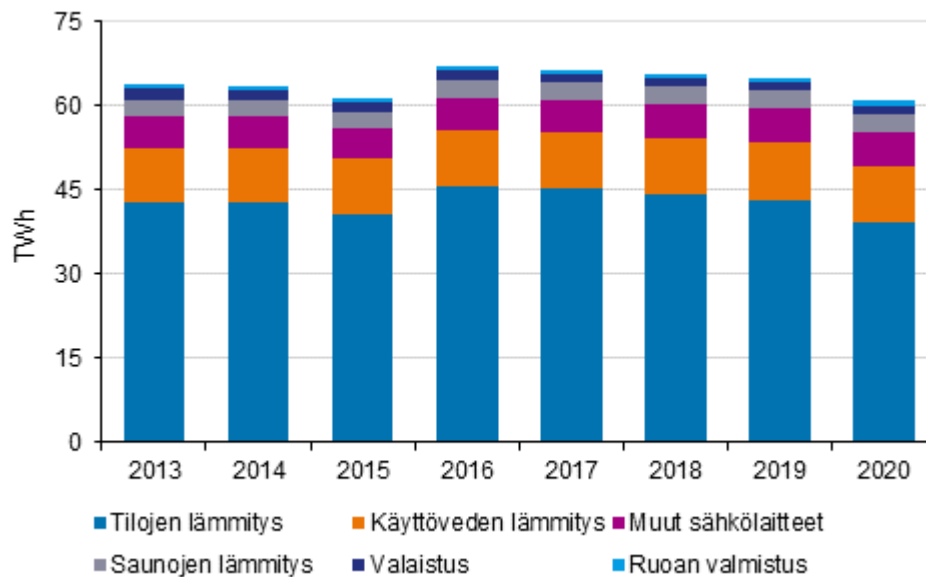
RAU-järjestelmällä on monia tehtäviä, mutta tilojen pitäminen miellyttävänä sen käyttäjille on RAU-järjestelmän monimutkaisin tehtävä. RAU-järjestelmä on vastuussa tästä tehtävästä ohjaamalla LVI-järjestelmää. LVI-järjestelmään kuuluu lämmitys, vesi ja ilmanvaihto. Nämä systeemit kuluttavat myös huomattavan osan koko rakennuksen kokonaisenergiankulutuksesta. Suomen sääolosuhteissa LVI-järjestelmän kuluttama energian osuus korostuu, koska Suomessa lämmityskauden pituus voi olla jopa 10 kuukautta pohjoisessa ja pakkaset voivat olla kovia [4, s. 16].

Ohjattavan LVI-järjestelmän fyysisiä komponentteja ovat lämmityspatterit, joita voi sijaita osana ilmanvaihtoa tai itsenäisinä yksikköinä asunnossa. Lämpöenergian lähteenä pattereissa voi olla esimerkiksi kaukolämpö, joka on Suomessa rakennusten suosituin lämmitysmuoto [5]. Ilmanvaihtoon kuuluvat komponentit ovat puhaltimia, ja nämä jakaantuvat tulo- ja poistokoneisiin. Tulokoneet ottavat ulkoa raikasta ilmaa, ja poistokoneet poistavat rakennuksesta ilmaa. Poistokoneiden yhteyteen on usein asennettu lämmöntalteenottojärjestelmä, joka parantaa rakennuksen energiatehokkuutta. Viilennys on osana ilmanvaihtoa lämmönvaihtimien avulla. Kylmäenergia saadaan vaihtimille käyttämällä ilmastointilaitetta. Automaation tehtävä on ohjata harmoniassa edellä mainittuja prosesseja niin, että rakennuksen sisäilma pysyisi käyttäjille miellyttävänä. [6]

2.2 Energiankulutus rakennuksessa

Suomessa rakentamisessa täytyy ottaa huomioon rakennuksen käytön aikana tapahtuva energiankulutus. Säästeliäs energiankulutus täytyy osoittaa tekemällä energiatehokkuuslaskemat rakennuksesta. Rakennustuotteiden ja taloteknisten järjestelmien täytyy olla sellaisia, että tehonkulutus pidetään minimissä ja rakennuksen energiankulutusta voidaan seurata. [7]

Rakennuksessa kuluu energiaa erilaisiin prosesseihin. Suomessa eniten energiaa rakennuksissa kuluu tilojen lämmitykseen. Lämmitykseen kuluva energia oli lähes kaksi kolmasosaa kaikesta rakennuksissa käytetystä energiasta vuonna 2020. Seuraavaksi suurimmat kohteet, joihin energiaa kuluu, olivat käyttöveden lämmitys ja sähkölaitteet. Nämä vastasivat noin 25 % kaikesta energian kulutuksesta. Loput 10 % kuluivat saunojen lämmittämiseen, ruoan valmistukseen ja tilojen valaistukseen. Tämä jakauma on nähtävillä kuvassa 1.[8]



Kuva 1. Rakennuksen energiankulutusjakauma [8]

Lämpöenergian kulutusta voidaan tarkastella lämpötaseen avulla. Lämpötaseeseen lisätään prosessit ja kohteet, joihin lämpöä kuluu tai joista lämpöä syntyy. Eniten lämpöä rakennukseen tulee lämmitysjärjestelmästä, ja tämä vastaa noin 70 % kaikesta syntyvästä lämmöstä. Loput 30 % syntyvät sähkölaitteista, auringosta ja ihmisestä. Tätä 30 %:n osuutta kutsutaan myös ilmaislämmöksi, koska niistä ei synny suoranaisia lämmityskustannuksia. [9, s. 19]

Suurin lämpöhäviö rakennuksessa syntyy lämmön johtumisesta, joka vastaa melkein puolia kaikista lämpöhäviöistä. Suurin lämpöhäviö johtumalla tapahtuu ikkunoista. Tämä on merkittävää, koska pinta-alaltaan ikkunat ovat pienin elementti rakennuksessa. Seuraavaksi suurin yksittäinen lämpöhäviö syntyy ilmanvaihdosta, noin 35 %. Tämä tapahtuu poistoilman mukana siirtyvän lämmön siirtyessä ulos. Ilmanvaihdon lämpöenergian kulutusta pystytään vähentämään tehokkaalla lämmöntalteenottojärjestelmällä jopa 40 % [10]. [9, s. 19]

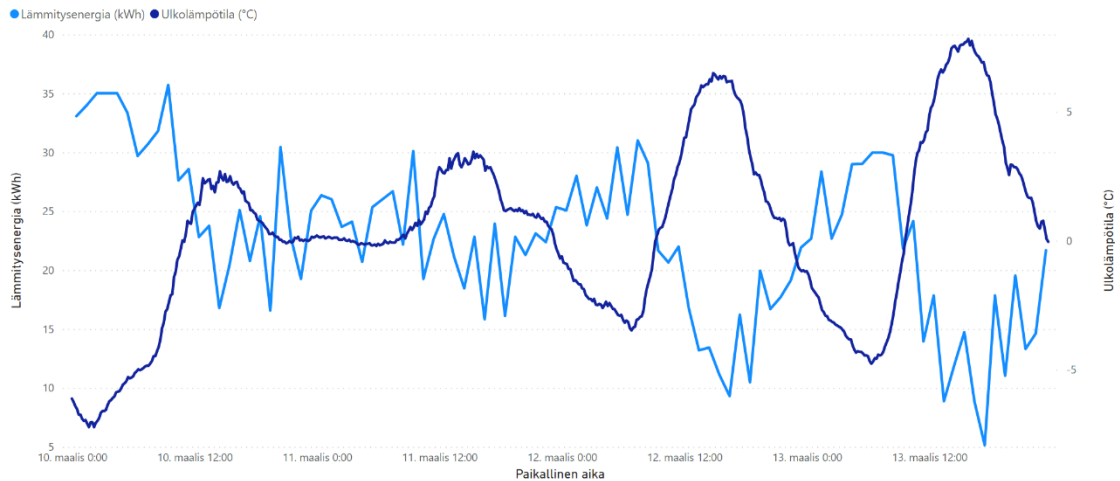
2.3 Rakennuksen dynamiikka

Jokaisella rakennuksella on sille tyypillinen dynamiikka eli ominaisuudet, miten se käyttäytyy erilaisissa olosuhteissa ajan funktiona. Dynamiikkaan vaikuttavat monet tekijät, mutta suurin tekijä on rakennuksessa käytetyt rakennusmateriaalit. Sääolosuhteet puolestaan ovat häiriö, joka vaikuttaa rakennuksen dynaamiseen käyttäytymiseen. [11]

Rakennuksen sisälämpötila käyttäytymisen dynamiikkaa voidaan ajatella prosessina, joka koostuu kahdesta erillisestä osaprosessista: lämmitys- ja lämpöhäviöprosessista. Itse rakennuksen lämpötila toimii prosessin yhtenä energiavarastona. Näillä prosesseilla on omat aikavakiot eli jokaisella osaprosessilla on oma muutosnopeutensa.

Lämpöhäviö koostuu kolmesta erillisestä fysikaalisesta ilmiöstä, joita ovat konvektio, johtuminen ja säteily. Lämpöhäviöprosessi on rakennuksen dynamiikan hitain osaprosessi, koska rakenteilla on heikko kyky johtaa lämpöä, mutta hyvä kyky varastoida sitä. On myös tärkeää huomata, että nämä prosessit voivat toimia lämmönsiirrotaan molempiin suuntiin riippuen vallitsevista olosuhteista. Tämä johtuu siitä, että prosessit ovat riippuvaisia pintojen ja ympäristön lämpötiloista ja siirtävät termodynamiikan lakien mukaisesti lämpöä kuumasta kylmään. [11, ss. 57–68]

Sää on systeemin ulkoinen häiriö. Riippuen rakennuksen lämpökapasiteetista ja lämmön johtavuudesta vaikuttaa sää eri tavalla rakennukseen. Alla olevassa kuvaajassa on esitelty erään Tampereella olevan kerrostalon lämmitysenergian kulutusta ja ulkolämpötilaa [12]. On nähtävillä selvää korrelaatiota niiden välillä, vaikka lämmitysenergian käyrä vaihtelee voimakkaasti. Vertaamalla käyriä voidaan sanoa, että kohdakkain olevien lämmitysenergian ja ulkolämpötilan huippuarvot eivät täysin kohtaa eli systeemissä on jokin aikavakio.



Kuva 2. Ulkolämpötilan vaikutus energiankulutukseen

Kiinteistön lämmitysprosessi on dynamiikaltaan nopeampi verrattuna kiinteistössä tapahtuviin lämpöhäviöihin. Lämmitysprosessi on yhdessä ilmanvaihdon kanssa ainoa ohjattava osaprosessi tässä systeemissä. Lämmitysprosessissa on oma energiavarasto, joka on veteen varastoitunutta lämpöä. RAU-järjestelmä ohjaa lämmitysprosessia sääntämällä toimilaitteita rakennuksessa. Näillä ohjataan energiaa mahdollisesti IV- tai patteriverkostoon. Prosessia ohjataan lämpökäyrän mukaan, joka on funktio lämmitysverkon lämpötilasta rakennuksen ulkolämpötilaan nähden. [11] [13]

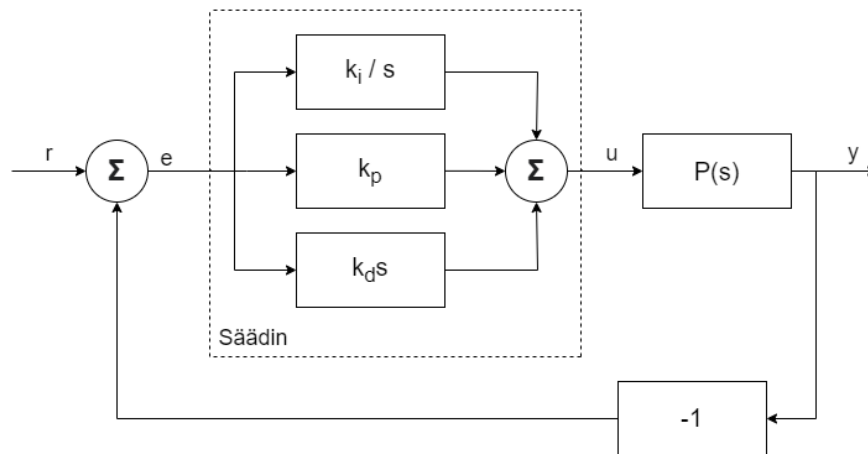
Dynamiikkaan vaikuttavat lisäksi useat erilaiset muuttujat. Näitä ovat esimerkiksi luonnolliset konvektiot tarkoittaen kaasujen siirtymistä ilman koneellisen ilmanvaihdon pakotusta. Tämä ilmiö aiheutuu paine- tai lämpötilaeroista, jotka ovat seuraus koneellisesta ilmanvaihdosta ja lämmityksestä. Myös kylmäsillat eli kohdat rakennuksen ulkovaipassa, joissa on heikompi lämpöeristys, ovat muuttujia rakennuksen dynamiikassa. Nämä eristykseltään heikot kohdat voivat olla tahallisia tai tahattomia. Kaikki nämä ja muut muuttujat, kuten auringonpaiste ja tuuli, aiheuttavat rakenteisiin sen, ettei pintojen lämpötilat ole tasaisia, mikä johtaa epästationääriseen lämmönjohtumiseen. Tätä on työlästä mallintaa ja siksi dynamiikkaa usein mallinnetaan yksinkertaistetusti. [11, ss. 61–64, 80–82, 85, 105]

3. PID- JA MALLIPREDIKTIIVINEN SÄÄDIN

Tässä kappaleessa esitellään työssä käytetyt säädintyypit. Käydään säätimien teoria läpi ja kuvataan niiden toimintaa.

3.1 PID-säädin

PID-säädin on yleisin käytetty säädin maailmassa ja vuonna 2002 97 % kaikista käytetyistä säätimistä jalostus-, kemian- ja paperiteollisuudessa olivat PID-säätimiä. Nimitys PID tulee sanoista proportionaali, integraali ja derivaatta, jotka ovat PID-säätimen osat. [14, s. 293]



Kuva 3. Lohkokaavio suljetusta systeemistä, joka sisältää PID-säätimen, muokattu lähteen mukaan [14, s. 294]

Kuvassa 3 on lohkokaavio systeemistä, joka sisältää prosessin $P(s)$, sitä ohjaavan säätimen sekä ideaalin mittauksen. Säättöpiiriin asetusarvo on r ja säätimen sisäänmenoarvo on erosuure e . Erosuure on prosessin ulostulon y ja asetusarvon r välinen erotus $e = r - y$. [14, s. 294]

Säädin koostuu kolmesta osasta, joilla kaikilla on oma funktionsa ja jokaisella on oma viritysparameetrinsa. Periaatteellisen säätimen ulostulo eli prosessin ohjaussuure u saadaan seuraavan kaavan mukaan:

$$u = k_p e + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt}, \quad (3.1)$$

jossa k_p on proportionaalivahvistus, k_i on integrointivahvistus ja k_d on derivointivahvistus ja nämä ovat PID-säätimen viritysparameetrit. [14, ss. 293–394]

Säätimen proportionaaliosan antama termi säätimen ulostuloon on verrannollinen säätimien tulevaan erosuureeseen. Proportionaalivahvistus k_p määrittää suhteen, jolla erosuure vaikuttaa proportionaaliosan termiin. P-säädin harvoin toimii yksin, koska se ei pysty yksinään saavuttamaan hyvää säätötarkkuutta. [14, s. 296]

Integroiva osa säätimessä integroi erosuuretta ajan yli. Koska I-säädin integroi erosuuretta, vaikuttaa sen ulostuloon erosuureen suuruuden lisäksi myös siihen kulunut aika. Integraattorin arvon muutosnopeutta voidaan vahvistaa muuttamalla integrointivahvistuksen k_i arvoa. Tällä integroivalla osalla on tärkeä rooli säätimen toiminnassa, sillä se mahdollistaa säätimen tarkkuuden. [14, s. 296]

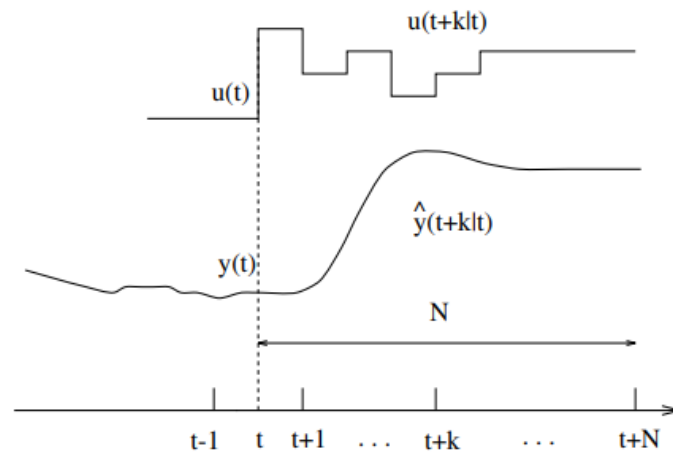
D-säätimellä on kyky huomioida erosuureen muutosnopeutta derivoinnin ansiosta. Derivointivahvistusta k_d muuttamalla pystytään vaikuttamaan derivaattaosan termin suuruuteen. Vaikka D-säädin pystyy nopeuttamaan säätöä, on se herkkä mittauskohinalle ja erityisesti korkeataajuiselle kohinalle. [14, s. 296]

3.2 Malliprediktiivinen säädin

Malliprediktiivinen säätö, MPC (Model Predictive Control), on säätötapa, jossa prosessista tehdyn dynaamisen mallin perusteella lasketaan säätimelle optimaalinen ohjaus määritetyn kustannusfunktion perusteella. MPC on saanut alkunsa 1970-luvun lopussa kemianteollisuudesta. [15]

Säätimen toimintaperiaatteena on, että se laskee tulevat prosessin säädettävien suureiden arvot ennalta määritetyn horisontin päähän, jota kutsutaan ennustushorisontiksi. Nämä tulevat ulostuloarvot $\hat{y}(t+k|t)$ ja ohjausarvot $u(t+k|t)$ lasketaan käyttämällä prosessin dynaamista mallia. Merkintä t on jokin ajanhetki ja k on jokin määritetty aika-askel tulevaisuudessa. Nämä arvot riippuvat prosessin sen hetkisestä tilasta ja tulevista ohjauksista, joilla tulevat arvot lasketaan. Tätä on havainnollistettu kuvassa 4. Tulevat arvot lasketaan ennustehorisontin pituuden N verran eli $k = 1 \dots N$. Notatio $(t+k|t)$ tarkoittaa, että $t+k$ arvo on laskettu hetkellä t . [15, s. 3]

Tulevat ohjausarvot lasketaan siten, että ne pitävät kustannusfunktion arvon minimaalisena ennalta määritettyjen kriteerien mukaisesti. Säädin pyrkii pitämään prosessin mahdollisimman lähellä referenssiarvoa. Kustannusfunktio on yleensä neliöllinen ja se sisältää virheen ennustetun ulostuloarvon ja ennustetun referenssiarvon väliltä sekä prosessiin muutokseen tarvittavan säätötyön määrän. Optimaaliselle säätöarvolle on mahdollista löytää tarkka arvo, jos kustannusfunktio on neliöllinen, malli on lineaarinen ja ei ole olemassa rajoitteita säädölle. Asian ollessa toisin käytetään iteratiivista optimointimethodia optimaalisen säätöarvon etsinnässä. [15, s. 3]



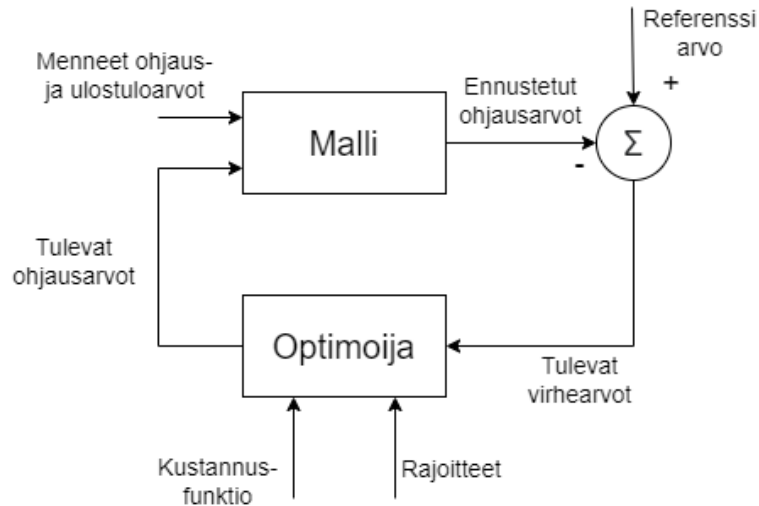
Kuva 4. MPC:n toimintaperiaate, kuva lähteestä [15, s. 3]

Sen jälkeen, kun ennustehorisontille on laskettu optimaalinen ohjausarvo $u(t|t)$ lähetetään se ohjausarvoksi prosessille. Tämän tapahtuessa seuraavat säätöarvot hylätään, koska nyt on saatavilla uusi prosessin ulostuloarvo $y(t + 1)$. Tämän jälkeen säädin laskee uuden optimaalisen säätöarvon mallille ennustehorisontin yli. [15, s. 3]

MPC-algoritmeissa on kolme pääkomponenttia ja kuva 5 havainnollistaa MPC:n yleistä rakennetta. Nämä elementit ovat

- ennustusmalli,
- kustannusfunktio ja
- rajoitteet.

MPC:n tärkein elementti on malli, jonka pohjalta säädin laskee ohjausarvot prosessille. Koska laskenta suoritetaan mallin perusteella, on säädölle elintärkeää, että malliin on saatu sisällytettyä kaikki prosessin oleelliset dynaamiset ominaisuudet. Mallin olisi myös hyvä olla samaan aikaan mahdollisimman yksinkertainen. [15, ss. 13–14]



Kuva 5. MPC:n yleinen rakenne, muokattu lähteen pohjalta [15, s. 4]

Malliprediktivisillä säätimillä on kustannusfunktio, joka on säätövirheen ja säätötyön painotettu arvo ja tätä kustannusfunktioita minimoimalla säädin laskee optimaalisen ohjausarvon prosessille. On mahdollista, että säätöä optimoimalla säätövirheen tai säätötyön merkitys toista suurempi. Tällöin on mahdollista antaa tärkeämmälle tekijälle suurempi painoarvo. [15, ss. 18–19]

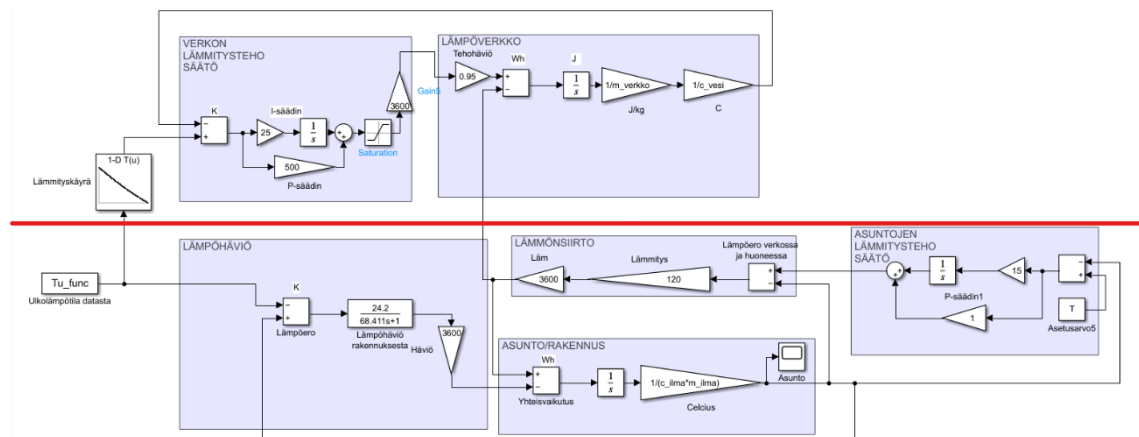
Säätimelle täytyy tietyissä tilanteissa käytännön takia antaa joitain rajoitteita, koska esimerkiksi prosessissa olevat toimilaitteet eivät välttämättä kykene liikkumaan tietyn säätöalueen ulkopuolelle tai toimilaitteen nopeus vaihtaa tilaa on rajallinen. Säätimelle asetettavat rajoitteet voivat olla pehmeitä tai kovia. Jos asetettu rajoite on kova, ei voi säädin missään tilanteessa sitä ylittää. Rajoitteen puolestaan ollessa pehmeä, säädin voi ylittää rajoitteen, mutta tästä seuraa se, että säätöliikettä sakotetaan tietyn painokertoimen mukaan, joka vähentää ohjausliikkeen suotuisuutta. [15, s. 21]

4. RAKENNUKSEN DYNAMIIKAN MALLINTAMINEN

Tässä luvussa esitellään rakennetun mallin rakenne ja käydään läpi mallin sisältämät parametrit. Mallin muodostamisen jälkeen luvussa 4.3 on esiteltyä mallista lasketut simulaatiotulokset.

4.1 Mallin rakenne

Malli on rakennettu Simulink-ohjelmistoon, joka on Matlabin kehittämä. Mallin tarkoitus on ottaa huomioon tärkeimmät muuttujat rakennuksessa eli mallissa huomioidaan lämmitys ja lämpöhäviö sekä niiden dynamiikat. Näin ollen rakennettu malli koostuu kahdesta itsenäisestä prosessista, jotka vaikuttavat toisiinsa lämmitystehon välityksellä. Kuvaan 6 on havainnollistettu tätä jakoa punaisella viivalla.



Kuva 6. Kuvakaappaus rakennuksen Simulink-mallista

Viivalla kahtia jaetun mallin ylempi osa kuvaa lämmitysverkkoa ja sen säätöä. Verkkoa säätää PI-säädin. Säätimessä on Saturation-lohko, joka on asetettu niin, ettei lämmitysteho putoa alle nollan. Kuten rakennusautomaatiossa, mallissa käytetään lämpökäyrää asetusravona lämpöverkolle. Lämpökäyrä on lämpöverkon lämpötila ulkolämpötilan funktiona. Kun kaukolämpöverkosta siirretään vaihtimen läpi energiaa rakennuksen lämpöverkkoon, tapahtuu energiahäviöitä. Tämä on otettu mallissa huomioon kertomalla signaali kertoimella 0,95 eli on määritetty, että prosessissa tapahtuu 5 % häviö. Häviö

on tärkeä ottaa huomioon, sillä pakkasten kiristyessä verkon lämpötila nousee lämpökäyrän mukaisesti. Tästä seuraa se, että lämmitysteho ja absoluuttinen energiahäviö verkossa kasvavat. [13]

Mallissa lämmitysverkon energiavarastona toimii integraattori, jolle on asetettu alkuarvo. Alkuarvo on lämpöenergia, joka on varastoitunut lämpöverkossa olevaan veteen. Tämä energia on laskettu seuraavalla kaavalla:

$$E_{verkko} = T_{vesi} c_{vesi} m_{vesi}, \quad (4.1)$$

jossa c_{vesi} on veden ominaislämpökapasiteetti, m_{vesi} on verkossa olevan veden massa ja T_{vesi} verkon lämpötila celsiusasteina.

Integraattorin arvo eli verkon energiaa muuttaa kaukolämpöverkosta tulevan tehon ja rakennusten lämmitystehon erotus. Lopuksi integraattorin jälkeen signaali jaetaan veden ominaislämpökapasiteetilla ja veden massalla, jotta saadaan selville veden lämpötila lämmitysverkon tehonsäätöä varten.

Kuvan 6 alemmassa osassa on rakennuksessa tapahtuva lämmitys ja rakennuksessa tapahtuva lämpöhäviö. Molempia prosesseja on yksinkertaistettu, mutta tarkkuudeltaan rakennettu malli riittää työn tarkoitukseen.

Todellisuudessa rakennuksen patteriverkosta siirtyvää lämpötehoa asuntoihin säätää jokaisessa asunnossa erilliset patteritermostaatit, mutta tässä mallissa tätä prosessia on mallinnettu PI-säätimellä, koska jokaisen erillisen huoneen termostaatin säädön mallintaminen olisi haastavaa ja tämän työn kontekstissa PI-säätimen käyttö tässä on tarpeeksi tarkka menetelmä. PI-säätimessä asetusrvona on haluttu sisälämpötila ja säädettävä suure on sisälämpötila, jota ohjaa pattereiden lämpötila.

Lämmönsiirtolohko mallissa kuvaa lämmönsiirtoa lämpöverkosta rakennuksen huoneilmaan. Pattereiden lämmönsäädöstä tulevasta pattereiden lämpötilasta vähennetään huonelämpötila, jolloin saadaan niiden välillä oleva lämpötilaero. Tämä lämpöero kerrotaan pattereiden lämmitystehokertoimella, joka on riippuvainen asennettujen pattereiden kokonaispinta-alasta sekä pattereiden lämmönsiirtokertoimesta. Tämä teho, joka pattereista syntyy, siirtyy huoneilmaan oletuksella, että huoneilma sekoittuu täydellisesti.

Rakennuksesta tapahtuvaa lämpöhäviöprosessia on mallinnettu erillisellä siirtofunktiolaan. Lämpöhäviön siirtofunktio on

$$H(s) = \frac{G}{\tau s + 1}, \quad (4.2)$$

jossa G on rakennuksen lämmönjohtavuus ulkoilmaan ja C on rakennuksen lämpökapasiteetti. Aikavakio tässä siirtofunktiossa on $\frac{C}{G}$ ja sen suuruus kertoo lämpöhäviöprosessin nopeuden. Mitä suurempi arvo aikavakiolla on, sitä hitaammin se reagoi järjestelmän muutoksiin. Siirtofunktion vahvistus on rakennuksen lämmönjohtavuus G . [11, ss. 106–107]

Lämpöhäviön suuruuteen vaikuttaa lämpötilaero, joka on rakennuksen sisä- ja ulkolämpötilan välillä. Tämä erotus toimii sisäänmenoarvona siirtofunktiolle. Mallin vahvistus eli rakennuksen lämmönjohtavuus skaalaa lämpötilaeron lämpöhäviötehoksi, lämmönjohtavuuden yksikön ollessa $[\frac{W}{K}]$.

Mallin toinen energiavarasto on rakennuksen ja rakennuksen sisältämän ilman varaama lämpöenergia. Tämä on toteutettu samalla tavalla kuin lämpöverkon varaama energia, mutta tässä on käytetty veden lämpökapasiteetin sijaan rakennuksen ja ilman lämpökapasiteettia. Integraattoriin on myös asetettu alkuarvoksi tietty energiamäärä, joka on

$$E_{rakennus} = T_s (C_{rak} + m_{ilma}c_{ilma}), \quad (4.3)$$

jossa T_s on rakennuksen sisälämpötila celsiusasteina, C_{rak} on rakennuksen lämpökapasiteetti, m_{ilma} on rakennuksen sisältämän ilman massa ja c_{ilma} on ilman ominaislämpökapasiteetti. Integraattorin arvoa eli rakennuksen energiamäärää muuttaa lämpöhäviö- ja lämmitystehojen erotus. Rakennuksen lämpötila saadaan selville ratkaisemalla kaavasta 4.3 lämpötila eli kertomalla rakennuksen sisältämä energiamäärä kertoimella $1/(C_{rak} + m_{ilma}c_{ilma})$.

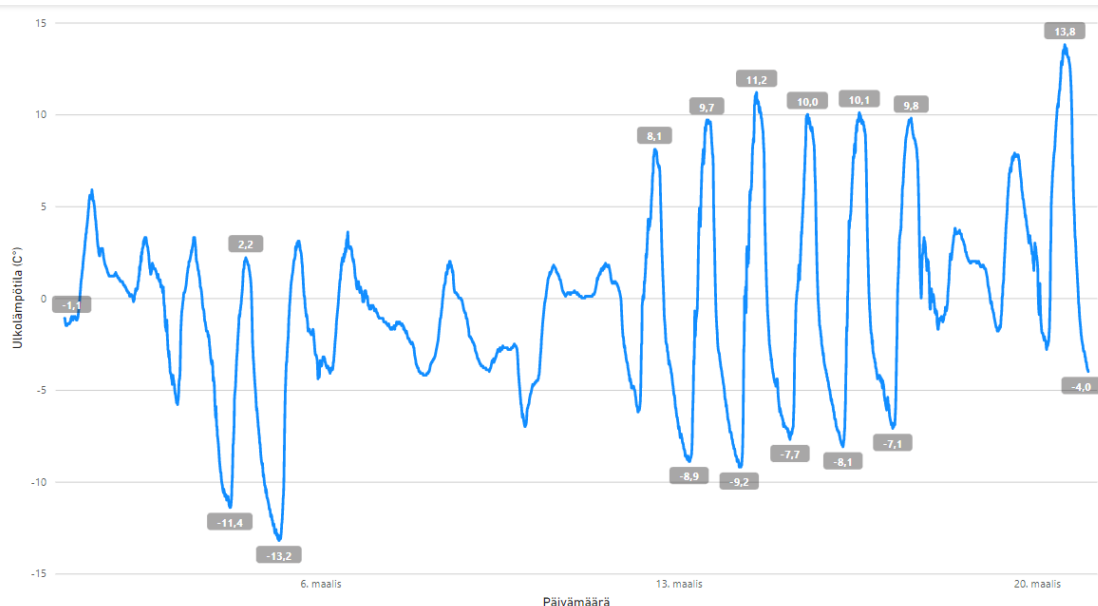
4.2 Mallin parametrit ja simulaatioskenaario

Simulaatioskenaario pohjautuu Olli Seppäsen kirjoittamassa kirjassa ”Rakennusten lämmitys” esiintyvään esimerkkiin [11, ss. 103 & 106]. Rakennus, jota tarkastellaan simulatiossa, on yksinkertainen 20-neliöinen tila, jossa on yksi 3x1 m kokoinen ikkuna. Lisäksi rakennuksen ulkoseinät sekä ylä- ja alapohja ovat rakennusmateriaaliltaan betonia. Alla olevassa taulukossa 1 on eritelty tarkemmin rakennuksen fyysiset dimensiot. Rakennuksen lämmitysverkon tilavuudeksi on määritetty yksi kuutio (1 m^3).

Taulukko 1. *Rakennuksen dimensioiden arvot*

Dimensio	Arvo
Pituus (m)	5
Leveys (m)	4
Korkeus (m)	3
Tilavuus (m³)	60

Simulointiin on ladattu oikeaa säädataa Ilmatieteenlaitoksen sivuilta ja havaintoasemana on käytetty Tampereen Härmälän havaintoasemaa [16]. Ajanjakson pituudeksi on valittu 20 päivää (noin 3 viikkoa) ja ajankohdaksi on valittu vuoden 2022 maaliskuun päivät 1.–20. Tämä on valittu ajankohdaksi, sillä silloin on nähtävillä nopeita lämpötilan muutoksia öiden ja päivien välillä sekä ajanjaksoja, jolloin on tasainen lämpötila ja jonka jälkeen lämpötila nousee kuvan 7 mukaisesti. Kuvaaja on ulkolämpötila ajan funktiona ja kuvaajaan on myös merkittynä joitain huippuarvoja ja niistä näkee lämpötilaerojen suuruuden päivän ja yön välillä.



Kuva 7. *Simuloinnissa käytetty säädata, muokattu lähteestä [16]*

Simuloinnissa on käytetty aika-askeleena tuntia, sillä rakennuksen lämmönsiirtoon liittyvät prosessit ovat hitaita, joten simulointiajan tarvitsee olla pitkä. Simuloinnin aika-askel on täytynyt siten ottaa huomioon ajasta riippuvien muuttujien yhteydessä.

Teho on yksi muuttuja, joka täytyy skaalata sekuntitasolta tuntitasolle. Tämä on suoritettu kertomalla tehon yksikkö watti kertoimella 3600 ja nämä näkyvät mallissa Gain-lohkoissa. Skaalauksen kertoimen suuruus selittyy watin määritelmästä, yksi watti on SI-järjestelmän perusyksikköinä $1 \frac{J}{s}$. Tunnin aika-askel on täytynyt myös ottaa huomioon

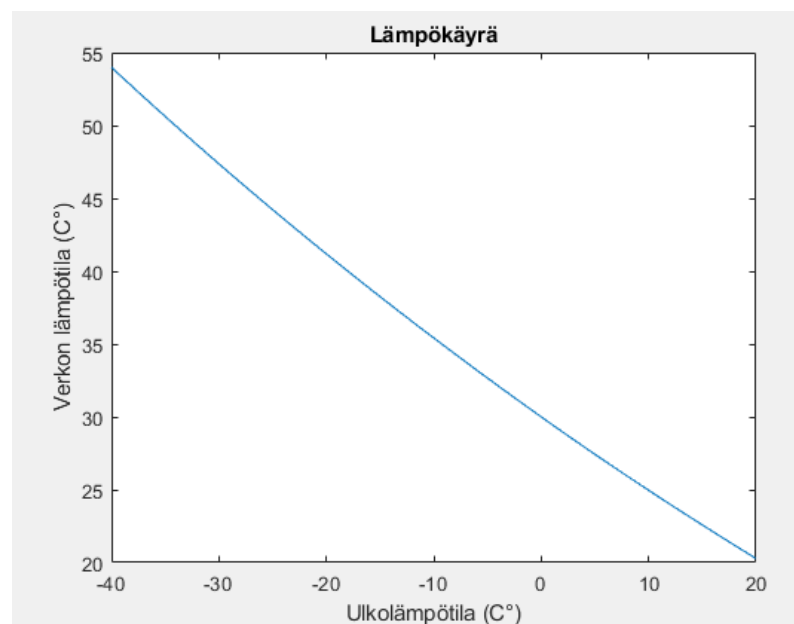
lämpöhäviöprosessin siirtofunktiossa, koska lämmönjohtavuuden parametrin yksikkö on $[\frac{W}{K}]$. Tämä täytyy siis jakaa kertoimella 3600, että päästään tuntitasolle.

Systeemissä oleville PI-säätimille on etsitty viritysparametrit manuaalisesti iteroimalla niitä, koska rakennuksessa ei ole tarvetta erittäin tarkalle lämpötilan säädölle. Taulukossa 2 on esitelty PI-säätimien viritysparametrit. PI-säätimien parametrit on asetettu sellaisiksi, että säätö on stabiili, lämpötila pysyy mahdollisimman tasaisena ja lämmitystehtoon syntyvät piikit ovat mahdollisimman pieniä.

Taulukko 2. PI-säätimien viritysparametrit

Verkon lämmitystehon säätö		Asuntojen lämmitystehon säätö	
P-vahvistus	500	P-vahvistus	1
I-vahvistus	25	I-vahvistus	15

Tärkeä parametri, joka vaikuttaa systeemin toimintaan ja lämmitysverkon tehon ohjaukseen, on lämpökäyrä eli lämmityksen säätökäyrä. Käyrä ohjaa lämmitysverkostoon menevän veden lämpötilaa ulkolämpötilan funktiona. Lämpökäyrän tavoitteena on se, että ulkolämpötilan vaihteluilla olisi mahdollisimman pieni vaikutus sisäilman lämpötilaan. Huonetermostaatit suorittavat lopullisen lämmityksen hienosäädön, koska eri tiloissa voi olla erisuuria lämpökuormia esimerkiksi ihmisten tai sähkölaitteiden takia. Kuvassa 8 on simuloinnissa käytetty lämpökäyrä, joka on luotu datan pohjalta ja se on oikeasta käyttökohteesta [12]. [17]



Kuva 8. Simuloinnissa käytetty lämpökäyrä, muokattu lähteestä [12]

Lämpöpattereiden luovuttama teho on riippuvainen pattereiden lämmönsiirtokertoimesta. Pattereiden luovuttama lämpöteho on

$$\dot{Q} = hA\Delta T, \quad (5.4)$$

jossa h on patterin lämmönsiirtokerroin [$W / (m^2K)$], A on pattereiden pinta-ala ja ΔT on lämpötilaero patterissa kulkevalla vedellä ja sisälämpötilalla. Patterin lämmönsiirtoker-toimelle on hankala löytää yleisesti käytettyä arvoa, mutta suurin osa arvoista on 10–20 $W / (m^2K)$ välillä. Täten h :n arvoksi on valittu 15 $W / (m^2K)$. Pattereiden kokonaispinta- alaksi on valittu 8 neliötä. Koska mallissa Gain-lohkolle tuleva signaali on lämpötilaero ΔT , sijoitetaan lohkon arvo $h * A$ eli 120 $\frac{W}{K}$. Näin saadaan pattereiden lämmitysteho.

Mallissa on lisäksi useita muita parametreja, joiden suuruus ja suhteet vaikuttavat simu- laatiossa syntyviin arvoihin. Kaikki loput arvot, joita yllä ei ole mainittu, on kerätty alla olevaan taulukkoon 3.

Taulukko 3. Simuloinnissa käytettyjä parametreja

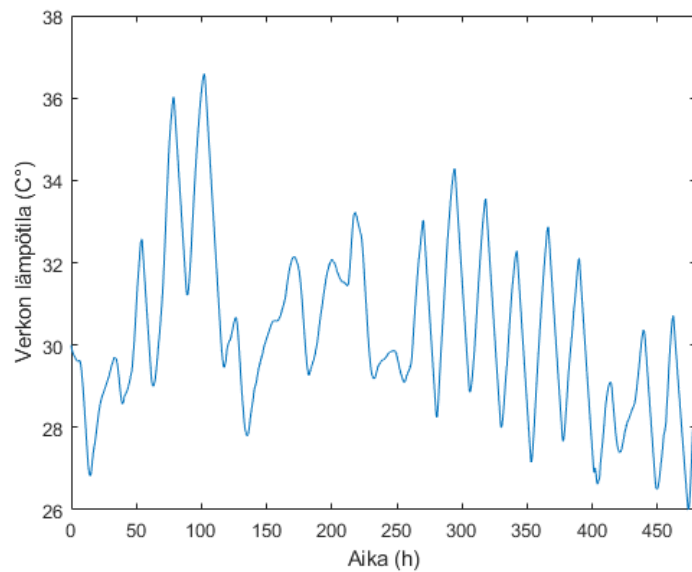
Parametri	Tunnus	Arvo	Yksikkö
Sisälämpötilan asetusarvo	T	22	Celsius
Rakennuksen lämmönjohtavuus	Gt	24,2	W / K
Rakennuksen lämpökapasiteetti	Ct	5960000	J / K
Lämmitysverkon veden massa	m_verkko	1000	kg
Veden ominaislämpökapasiteetti	c_vesi	4186	J / (K*kg)
Sisäilman massa	m_ilma	73,5	kg
Ilman ominaislämpökapasiteetti	c_ilma	1010	J / (K*kg)

Osa parametreista on fysikaalisia vakioita, kuten ominaislämpökapasiteetit, ja osa on laskettu hyödyntämällä fysikaalisia vakioita, kuten massat. Nämä massat on saatu ker- tomalla tilavuus aineen tai kaasun tiheydellä. Lisäksi taulukosta löytyy rakennuksen läm- mönjohtavuus ja lämpökapasiteetti, ja ne ovat myös kirjasta liittyen samaan esimerkkiin kuin rakennuksen dimensiot [11, s. 106].

4.3 Mallin simulointi

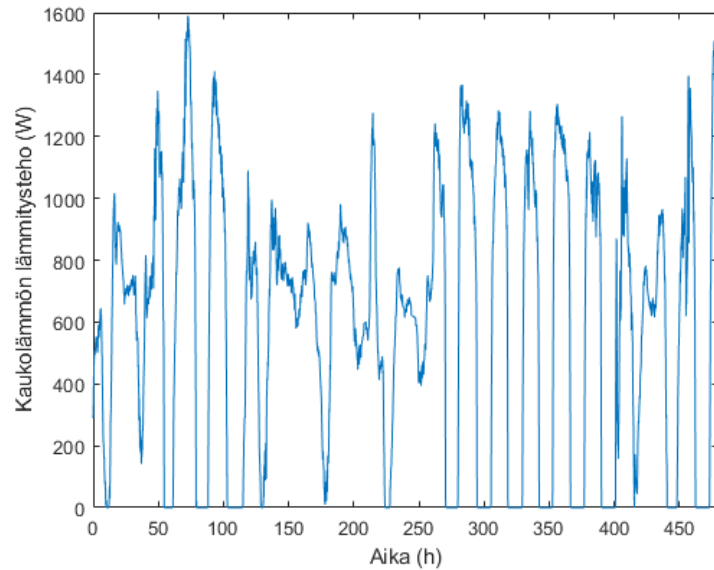
Mallin simulointi on toteutettu Matlabin Simulink-ympäristössä. Alkuarvoiksi malliin on asetettu arvot siten, että malli on valmiiksi stabiilissa tilassa. Verkon lämpötilaksi on ase- tettu lämpökäyrän mukainen lämpötila ensimmäisellä ulkolämpötilan mittaushetkellä. Käyrästä saadaan ulkolämpötilan ollessa -1 celsiusastetta lämpöverkon lämpötilalle ar- voksi 30 astetta.

Lämpöverkon lämpötila vaihtelee voimakkaasti ulkolämpötilan vaihdellessa, koska verkon asetusarvo seuraa sille asetettua lämpökäyrää. Ulkolämpötilan vaihtelut täten vaikuttavat siis nopeasti verkon lämpötilaan ja tämä on huomattavissa kuvassa 9. Verkon lämpötilan korkein arvo löytyy, kun aikaa on kulunut noin 100 tuntia ja tällöin verkon lämpötila on noin 36,5 astetta. Tuolla hetkellä ulkolämpötila on noin -13 astetta, ja verkon lämpötila on aika hyvin linjassa lämpökäyrän kanssa. Matalin lämpötila puolestaan on simulaatio jakson loppupäässä hetkellä, jolloin simulaatiota on kestänyt noin 475 tuntia. Tällöin verkon lämpötila on 26 astetta.



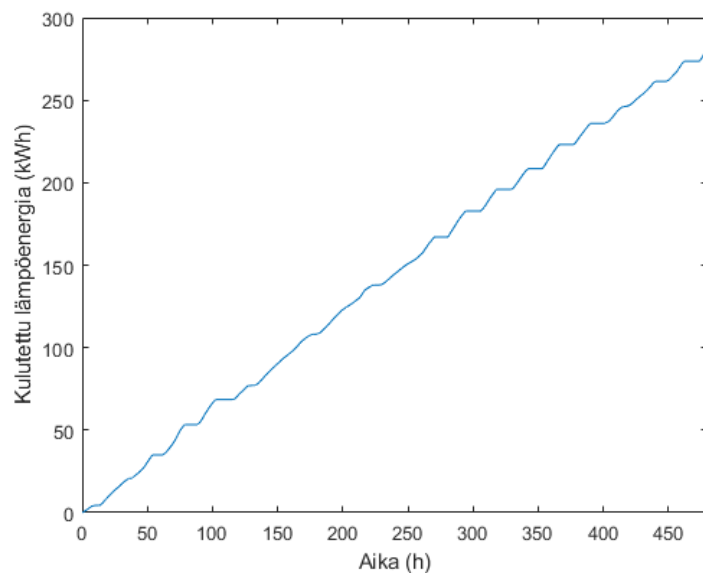
Kuva 9. Rakennuksen lämpöverkon PI-säädöllä lämpötila ajan funktiona

Lämpöverkon lämpötilavaihtelut näkyvät myös kaukolämmöstä tuotavan tehon piikkeinä ja ne näkyvät selkeästi alla olevassa kuvaajassa. Lämpökäyrästä tulevan asetusarvon lisäksi tarvittavaan lämmitystehoon vaikuttaa verkosta rakennuksen tiloihin siirtyvä lämpöenergian määrä. Kun katsotaan tehon kuvaajaa, on huomion arvoista lämmitystehossa, että monessa kohtaa verkkoa ei lämmitetä ollenkaan ja lämmitystehon huippuarvo on hetkellisesti lähes 1,6 kW.



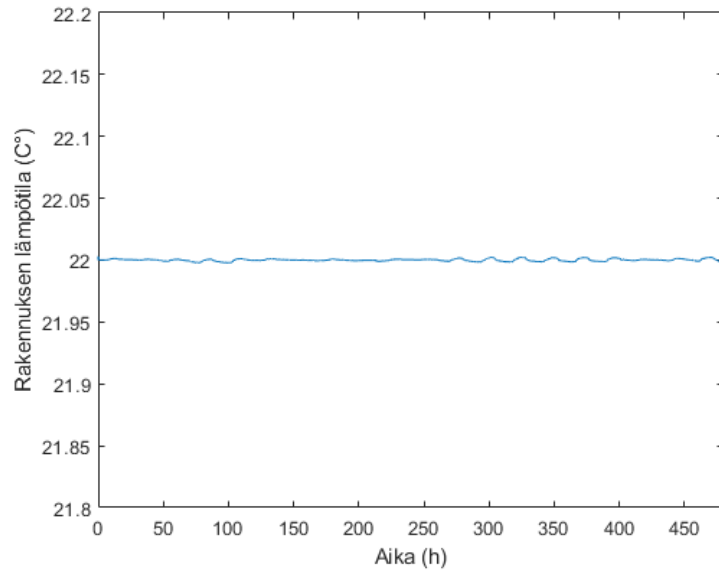
Kuva 10. *Kaukolämmön lämmitysteho PI-säädöllä ajan funktiona*

Kaukolämpöverkosta tuotava lämpöenergia on laskettu integroimalla kaukolämmöstä tuotua lämmitystehoa. Lämpöenergia on näkyvillä kumulatiivisena kuvaajana kuvassa 11. Hetket, jolloin kaukolämmön lämmitysteho on nolla, näkyy myös selkeästi kuvaajassa. 20 päivän simulaatiojakson aikana lämmitysenergiaa rakennuksessa kului 281,6 kWh



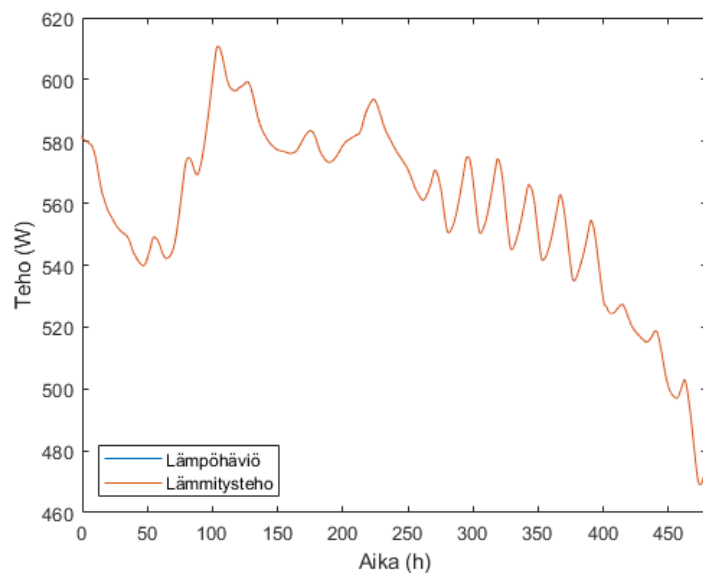
Kuva 11. *PI-säädöllä kulunut lämmitysenergia kumulatiivisena käyränä*

Rakennuksen lämpötila pysyy suurista lämpötilavaihteluista huolimatta lähes vakiona asetusarvossaan. Alla olevasta kuvaajasta on nähtävillä, että rakennuksen lämpötila kuitenkin värähtelee hieman, mutta ihminen ei ole kuitenkaan kykeneväinen huomaamaan näin pientä lämpötilan muutosta.

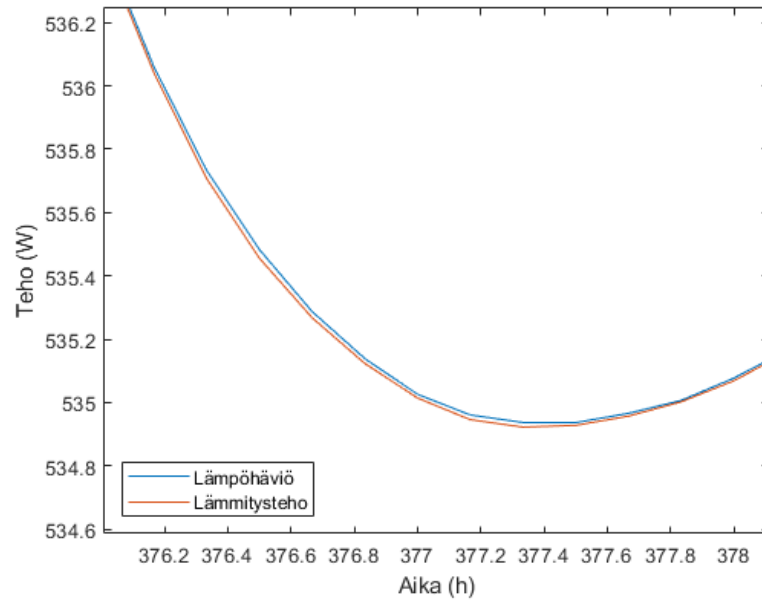


Kuva 12. PI-säädöllä rakennuksen sisälämpötila ajan funktiona

Lämmityksellä on tarkoitus kompensoida rakennuksesta tapahtuvaa lämpöhäviötä. Kuvassa 13 olevassa kuvaajassa on nähtävillä rakennuksessa lämpöhäviötehon ja lämmitystehon määrä ajan funktiona. Lopussa tarvittava lämmitysteho on jopa noin 20 % pienempi kuin kovimmilla pakkassilla tarvittu lämmitysteho. Ajankohdalla 300 h on myös havaittavissa nopeiden ulkolämpötilavaihteluiden vaikutus tarvittavaan lämmitystehoon.



Kuva 13. Rakennuksen lämmityksen ja lämpöhäviön tehot PI-säädöllä ajan funktiona



Kuva 14. Tarkennettu otos kuvasta 14

Syy kuvan 13 yhdelle näkyvälle käyrälle on, että PI-säädin on suunniteltu pitämään rakennuksen sisälämpötila vakiona. PI-säädin aiheuttaa sen, että rakennuksen lämmitysteho seuraa hyvin tarkasti lämpöhäviötehon määrää. Tämä on nähtävillä kuvassa 14.

5. SÄÄDÖN OPTIMOINTI

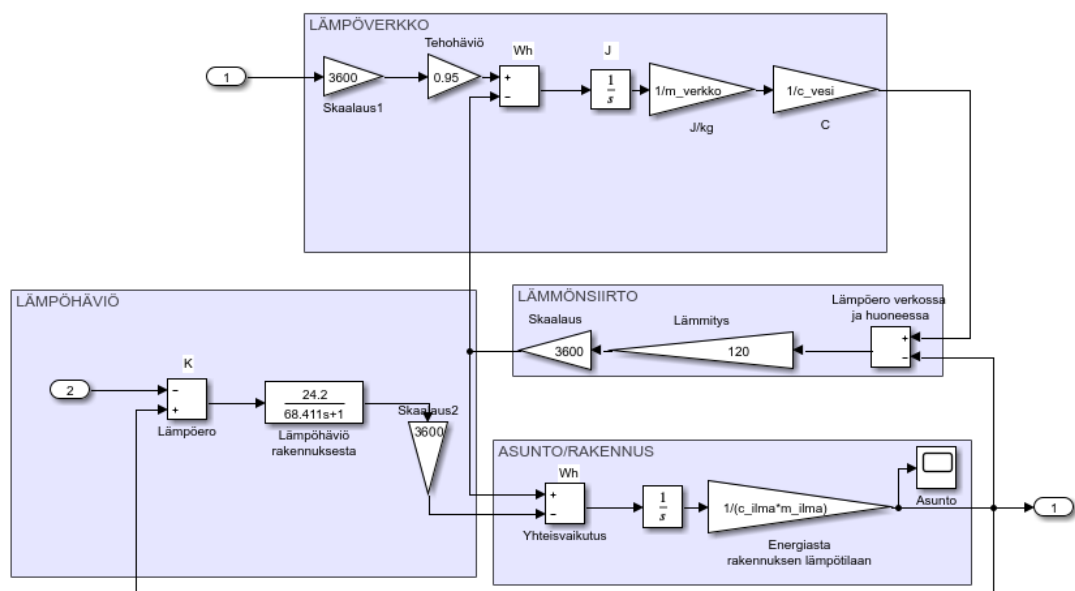
Tässä luvussa muodostetaan malliprediktiivinen säätö malliin. Tämän jälkeen simuloidaan rakennuksen dynaamista mallia ja käydään simuloinnin tuloksia läpi.

5.1 Malliprediktiivisen säädön rakentaminen

Malliprediktiivisen säädön rakentamiseen on käytetty Matlabin Model Predictive Control Toolboxia. Tämä on työkalu, jolla pystyy muodostamaan MPC-säätimen suoraan tilamallista ja mallin voi olla lineaarinen tai epälineaarinen. Työkalussa on mahdollista muokata rakennettavan säätimen parametreja helposti. [18]

Rakennuksesta muodostettu Simulink-malli on muutettu kuvan 15 mukaiseen muotoon säätimen muodostamista varten. Rakennettava säädin tulee ohjaamaan rakennuksen lämmitystä suoraan rakennuksen lämpöverkon kautta toisin kuin kuvan 8 mukaisessa mallissa, jossa on ohjaus erikseen lämpöverkolle ja rakennuksen lämmitykselle.

Mallissa olevat lohkot, joissa on numero 1 tai 2 on input- tai outputlohkot. Vasemmalla puolella olevat lohkot 1 ja 2 ovat sisäänmenoarvoja malliin. Lohko 1 on lämpöverkkoon tuleva teho ja lohko 2 on ulkolämpötila. Oikealla puolella oleva lohko 1 on rakennuksen lämpötila.



Kuva 15. Simulink-malli malliprediktiivisen säädön muodostamiseen

Tilamallin tilamatriisit saadaan tästä Simulink-mallista käyttämällä Matlabin komentoa "linmod". Komento palauttaa sille parametrina annetun Simulink-mallin tilamatriisit li-nearisoimalla jokaisen lohkon mallista erikseen. Komento palauttaa arvot

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -5,819 & -1273 & 0,1032 \\ 1,347 * 10^{-5} & -0,01462 & 0 \\ 5,819 & 0 & -0,1032 \end{bmatrix}$$

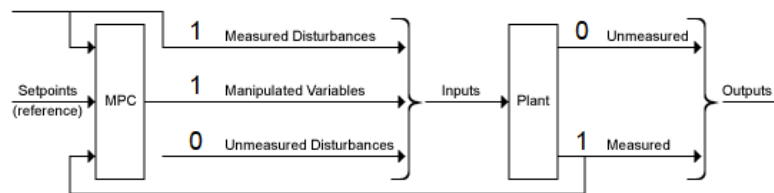
$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -1 \\ 3420 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1,347 * 10^{-5} \quad 0 \quad 0]$$

$$\mathbf{D} = [0 \quad 0],$$

jossa A, B, C ja D ovat tilamallin dynamiikka-, ohjaus-, mittaus- ja suoravaikutusmatriisit. Lopuksi näistä muodostetaan Matlabin State Space -komennolla (ss) tilamalli Matlabin työtilaan.

Nyt käynnistetään MPC toolbox ja määritetään säätimen ennustemalliksi Simulink-mallista muodostettu tilamalli. MPC-säätimen rakenne on määritetty siten, että sillä on 1 ohjaussuure (lämmitysteho), 1 säädettävä suure (rakennuksen lämpötila) ja 1 mitattava häiriö (ulkolämpötila). Tämä rakenne kuvattuna kuvassa 16. Systeemiin tuleva häiriö eli ulkolämpötila on tiedossa sääennusteen muodossa ja säädin lukee tätä.



Kuva 16. Kuvankaappaus säätimen rakenteesta

Tämän jälkeen avataan "I/O Attributes" -ikkuna ja määritetään parametrien nimet, mitattayksiköt ja nimelliset arvot. Nimellisiksi arvoiksi määritetään lämmitysteholle 550 W, rakennuksen lämpötilalle 22 °C ja ulkolämpötilalle -10 °C. Tässä kohtaa olisi tarvittaessa myös mahdollista määrittää skaalaukset parametreille, mutta se ei ole tarpeellista tässä, sillä skaalaukset on tehty malliin jo valmiiksi.

Siirrytään työkalun "Tuning"-osioon, jossa säätimelle asetetaan tarvittavat säätöparametrit. Aiemman rakennusten MPC-säädöstä kirjoitetun kirjallisuuden mukaan säädön näytteenottoväli T_s on yleisesti 15–180 minuuttia rakennuksen hitaan dynamiikan vuoksi.

Saman lähteen mukaan ennustehorisontti N on yleisesti 5–48 tuntia ja sen olisi hyvä kattaa systeemin asettumisaika [19]. Muutaman iteraation jälkeen asetetaan näytteenottoväli arvoksi $T_s = 1$ (60 minuuttia) ja ennustehorisontti $N = 48$ (48 h). Asetetaan myös Matlabin dokumentaation mukaisesti MPC Designerissa säätöhorisontti m pienemmäksi kuin ennustehorisontti ja mahdollisimman pieneksi, että ei käytetä paljoa laskentatehoa [20]. Tässä taas muutaman iteraation jälkeen asetetaan $m = 2$.

Tehon ei ole mahdollista pudota negatiiviseksi, koska se tarkoittaisi, että rakennuksen lämpöverkkoa jäähdytettäisiin. Asetetaan siis säätimelle kovaksi rajoitteeksi tehon minimiarvo 0 W. Lisäksi asetetaan kustannusfunktion tekijöille painoarvot, joilla niitä halutaan sakottaa. Painoarvot skaalaavat sille asetetun tekijän virheen suuruutta niin, että voidaan antaa toiselle tekijälle suurempi merkitys kuin toiselle. Painoarvojen valinta tässä työssä on tasapainottelua sisälämpötilan ja energiankulutuksen välillä. Taas muutaman iteraation jälkeen asetetaan lämmitystehon muutoksen painoarvoksi 3 ja sisälämpötilan painoarvoksi 10.

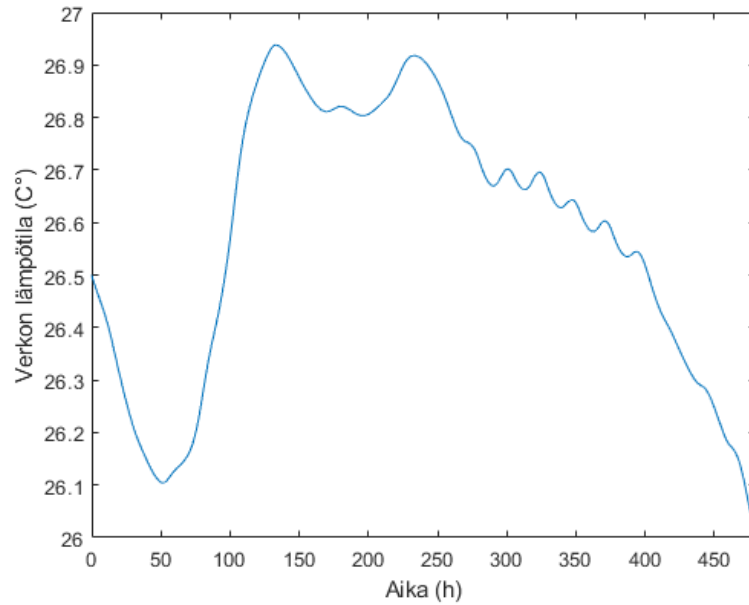
5.2 Simulointi MPC-säädön kanssa

Rakennuksen simulointi säätimen kanssa vaatii, että MPC toolboxissa rakennettu säädin viedään työtilaan. Simulink-malliin täytyy lisätä MPC Controller -lohko, joka toimii säätimenä. Lohkon sisälle annetaan parametriksi MPC toolboxista tuotu säädin, joka sisältää tarvittavat parametrit säätimen toimintaa varten.

MPC Control -lohkoon liitetään kolme sisäänmenosignaalia, jotka ovat prosessin mitattu ulostulo (sisälämpötila), referenssiarvo (asetusarvo) ja mitattu häiriö (sääennuste). Mitattu häiriö on Ilmatieteenlaitokselta ladattu säätiladata. MPC Control -lohko lukee tulevaa säätilatieta lämpötilavektorista määritetyn ennustehorisontin päähän ja hyödyntää sitä säätöarvon optimoinnissa [21].

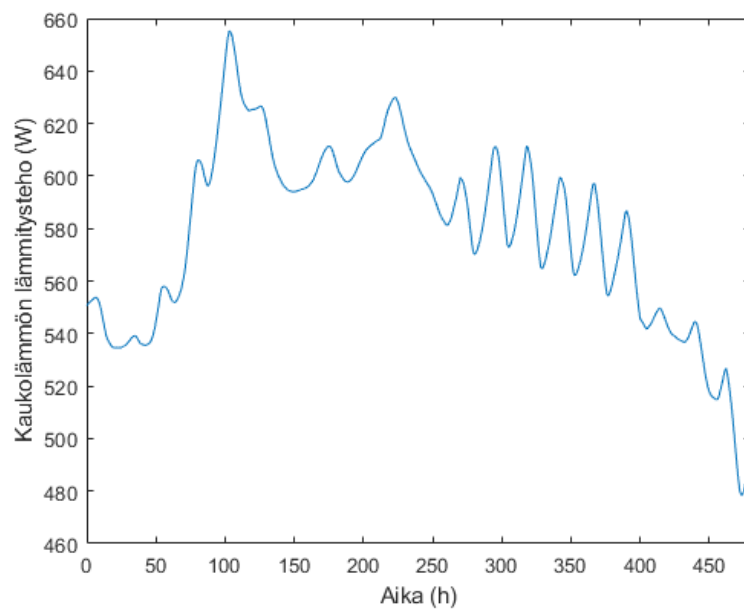
MPC-säädön kanssa lämpöverkon lämpötila ei enää noudata lämpökäyrää vaan säädin pitää lämpötilan sellaisena, jonka se näkee sopivan sen hetkiseen lämmitystarpeeseen ja tulevaan ulkolämpötilaan. Kuten alla olevasta kuvaajasta näkee, verkon lämpötila lähtee 26,5 asteen alkuarvosta ja pysyy lähes koko tarkastelujakson ajan 26–27 asteen välillä. Simulaation lopussa verkon lämpötila kuitenkin lähtee putoamaan alle 26 asteen.

Tässä simulaatioskenaariossa kohderakennus on pieni. Rakennuksen ollessa suurempi olisi sillä suurempi kyky varastoida lämpöä ja tämä voisi näkyä lämpöverkon lämpötilan käyrässä entisestään pienempinä lämmönvaihteluina.



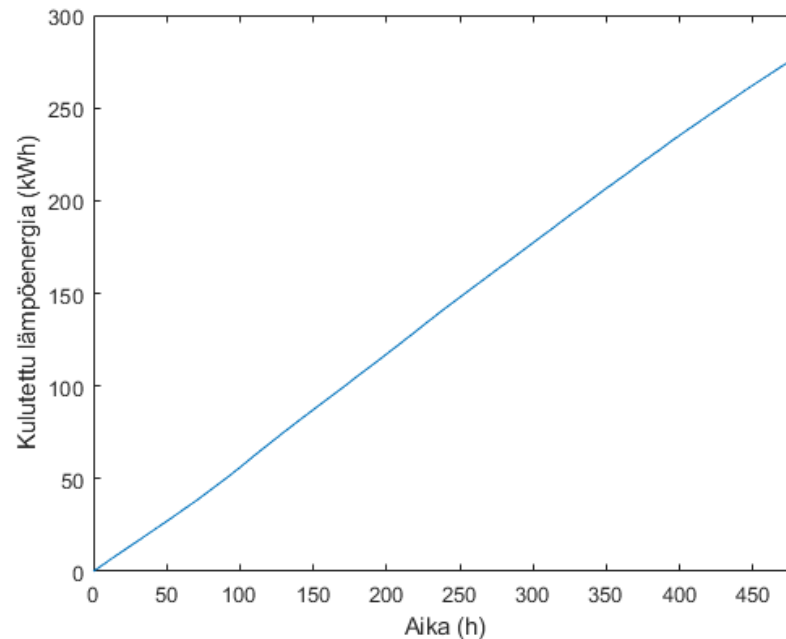
Kuva 17. Lämpöverkon lämpötila MPC-säädöllä ajan funktiona

Lämmitysverkon lämpötilan pysyessä hyvin tasaisena ei myöskään kaukolämpöverkosta tuleva lämmitysteho vaihtele suuresti. Kuvien 17 ja 18 välillä on huomattavissa yhtäläisiä trendejä, mutta paikoitellen on huomattavissa myös se, että säädin ottaa tulevaa säätilaa huomioon.



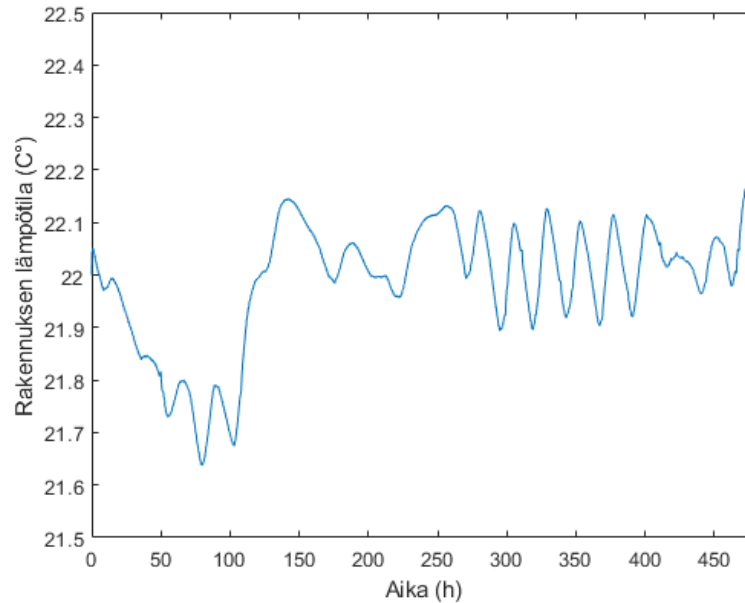
Kuva 18. Kaukolämmön lämmitysteho MPC-säädöllä ajan funktiona

Suhteellisen tasaisen lämmitystehon huomaa myös kumuloituvan lämmitysenergian kuvaajassa. Tämä kulutus on laskettu samalla tavalla kuin kohdan 5.3 energiankulutus tehokäyrästä. Koska MPC-säädöllä lämmitystehokäyrä oli suhteellisen tasainen, näkyy se energiakäyrän linearisuutena. MPC-säädöllä rakennuksen energiankulutus 20 simulaatiojakson jälkeen oli 277,1 kWh.



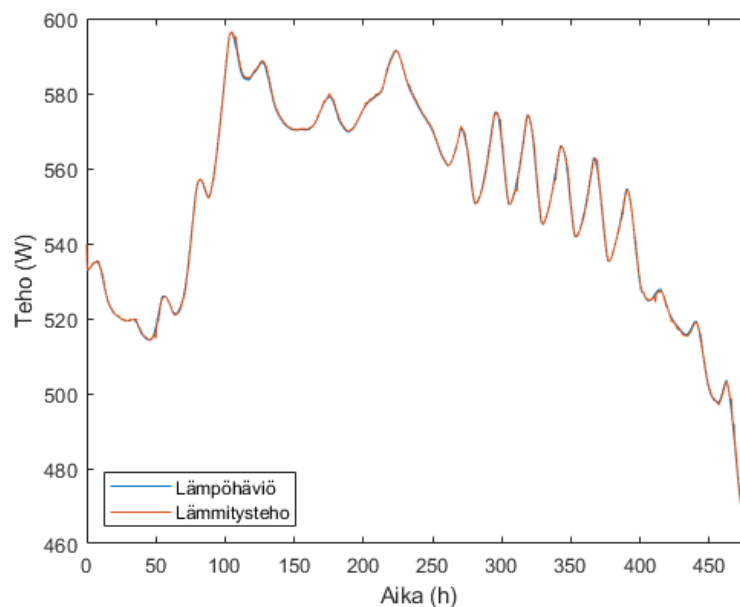
Kuva 19. MPC-säädöllä kulunut lämmitysenergia kumulatiivisena käyränä

MPC-säädön vaikutuksen huomaa erittäin hyvin nyt rakennuksen sisälämpötilan käyrästä. Säädin antaa lämpötilan joustaa 22 asteen molemmilla puolilla ja suurin poikkama on noin 0,4 astetta 75 tunnin simulaation kohdalla. Säätimen parametrejä muuttamalla lämpötilan vaihtelun suuruutta pystyisi joko lisäämään tai vähentämään. Se miten suurella amplitudilla sisälämpötilan annetaan vaihdella, on suora vaikutus energian kulutukseen. Jos rakennuksen lämpötila annettiin tarkastelujakson aikana heilua parhaimmillaan yhden asteen, päästiin kokonaiskulutuksesta säästämään muutama kilowattitunti.

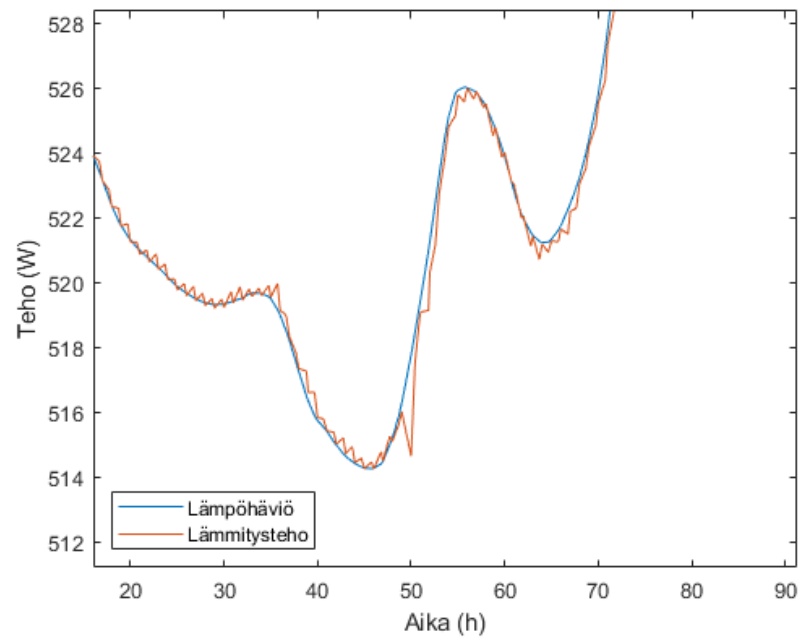


Kuva 20. Rakennuksen sisälämpötila MPC-säädöllä ajan funktiona

Lämmitystehon ja lämpöhäviön käyrät menevät MPC-säädöllä myös päällekkäin, kuten kuvasta 21 näkee. Tällä säätötavalla on kuitenkin nähtävissä lämmitystehon poikkeamia lämpöhäviön käyrästä. Nämä kuvan 22 mukaiset poikkeamat johtuvat siitä, että MPC-säätö ei ole jatkuva-aikainen säätö. Säädön ohjausarvo päivittyy tunnin välein.



Kuva 21. Rakennuksen lämmityksen ja lämpöhäviön tehot MPC-säädöllä ajan funktiona



Kuva 22. Tarkennettu kuvasta 23

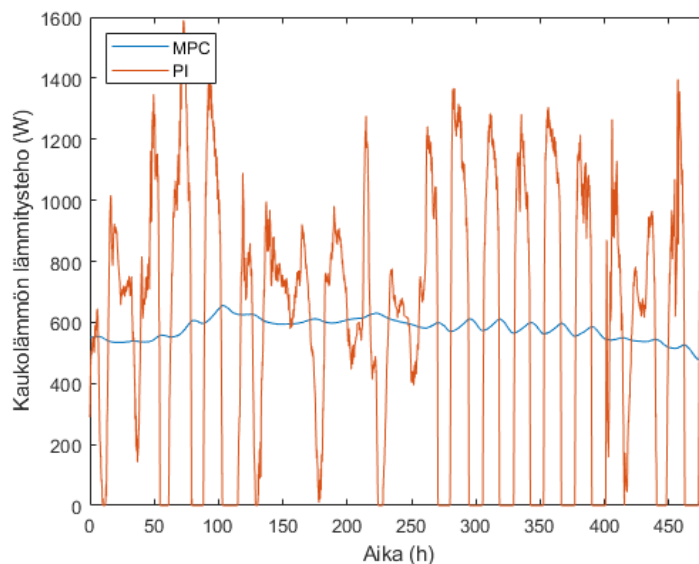
6. TULOSTEN VERTAILU

Tässä kappaleessa on tarkoitus vertailla lukujen 5 ja 6 simulointituloksia ja tehdä niistä huomioita. Koska kaukolämpöverkosta tuleva energia on rakennuksen todellinen energiankulutus häviöineen, tarkastellaan lähimmiten sitä.

Säätötavoilla ei ollut suurta eroa käytetyn kaukolämpöenergian määrässä. 20 päivän simulaatiojakson jälkeen MPC-säädöllä energiaa kului 281,6 kWh ja MPC-säädön kanssa sitä kului 277,1 kWh. Säästetty energian määrä on siis 4,5 kWh, joka on 1,6 % säästö. Simuloidessa erilaisilla säätimen parametreilla päästiin 1–6 % säästöihin, mutta säästön oltua noin 3 % sisälämpötila putosi kahden asteen päähän asetusarvostaan.

Esitelty energian säästö ei prosentuaalisesti suuri, mutta 1,6 %:n säästö Suomessa valtakunnallisella tasolla kuvan 1 mukaan, tämä energiasäästö olisi noin 0,5 TWh. On myös mahdollisuus, että MPC-säätimeen on löydettävissä paremmat säätöparametrit, ja näin säästöä olisi myös löydettävissä enemmän.

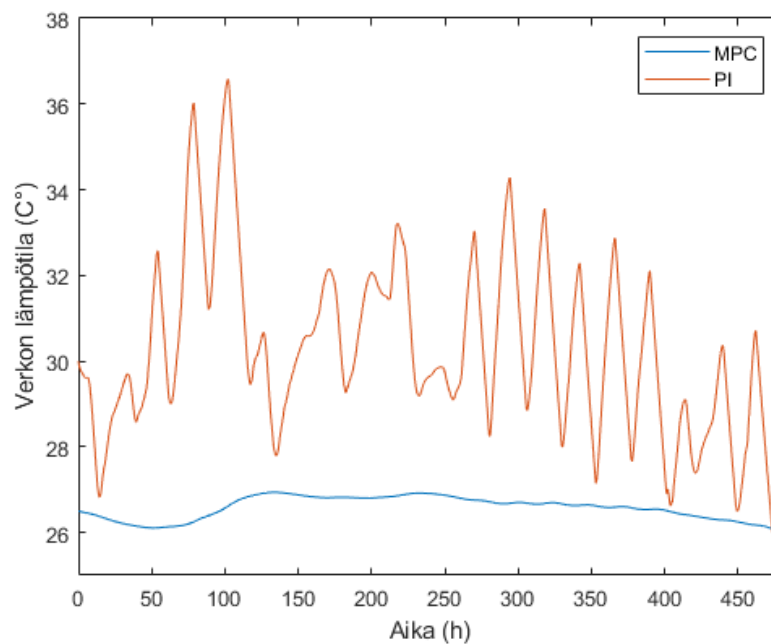
Vaikka kaukolämpöenergiankulutuksessa tapahtuva säästö on suhteellisen pieni, on huomattavissa todella selkeä ero kuvassa 23, siinä miten nämä säätötavat säätävät tehoa. MPC-säädöllä teho on melkein pä vakio verrattuna PI-säätöön. MPC-säädöllä teho ei tipu kertaakaan nolnaan.



Kuva 23. Kaukolämmön tehon vertailu

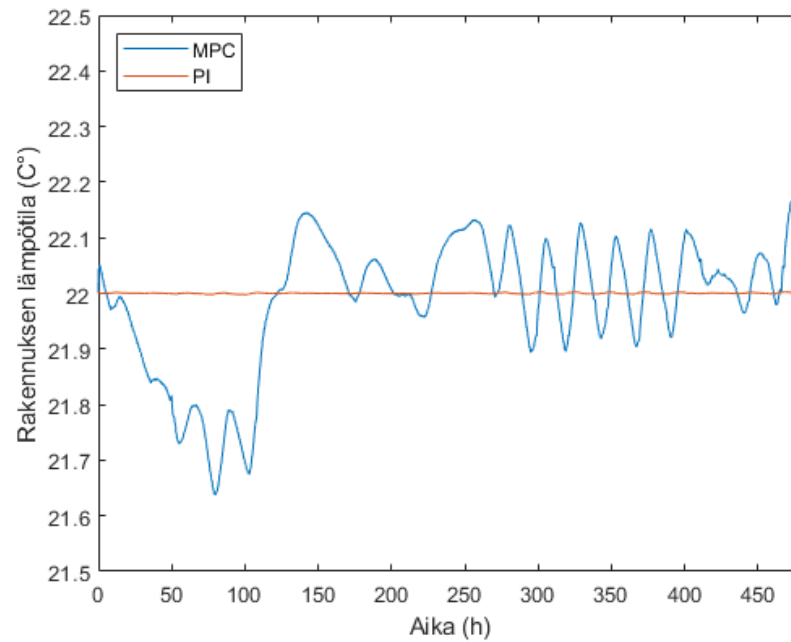
Kustannusnäkökulmasta suurten tehopiikkien puuttuminen on positiivinen asia, koska kaukolämmön hinta jakaantuu teho- ja energiamaksuun [22]. Tämä johtaa siihen, että korkeiden hetkellisten kulutusten takia rakennukseen täytyy tilata korkeampi tilausvirtaus, joka nostaa kustannuksia. MPC-säädöllä kulutus on paljon tasaisempi ja voimakkaat tehopiikit puuttuvat, joten tehomaksut olisivat pienemmät tällä säätötavalla.

Rakennuksen lämmitysverkon lämpötilassa on suuret erot säätötyyppien välillä. Tämä johtuu suureksi osaksi, että MPC-säädön kanssa verkon lämpötilaa ei ajettu lämpökäyrän mukaan. Kuvasta 24 huomataan, että tarkastelujakson aikana MPC-säädöllä verkon lämpötila käy vain kerran PI-säätöä korkeammalla ajanhetkellä noin 470 h.



Kuva 24. Lämpöverkon lämpötilan vertailu

MPC-säädöllä pystytään muodostamaan säästöjä energian kulutukseen, kun tiedetään tuleva sääennuste. Ennustetta hyödyntämällä rakennuksen lämpötilan voidaan antaa vaihdella niin, että optimoidaan lämmitystehon käyttöhetki. Rakennuksen sisälämpötilan kuvaajasta tämä lämpötilavaihtelu on hyvin huomattavissa. MPC-säädöllä sisälämpötila vaihtelee ulkolämpötilavaihteluiden mukaan ja se on huomattavissa esimerkiksi ajanhetkellä 300 h. Silloin ulkolämpötilassa on myös nopeita vaihteluita vuorokausivaihteluiden mukaan.



Kuva 25. Rakennuksen lämpötilan vertailu

Riippuen rakennuksen käyttäjien mieltymyksistä lämpötilan voisi antaa laskea matalammallekin, joka johtaisi säästöihin. On myös mahdollista, jos rakennus olisi suurempi ja sillä olisi suurempi kyky varastoida, voisi se yhdessä suuremman sisälämpötilan heilumisvaran kanssa saada aikaan lisää säästöä. Tällöin hitaammin laskeva lämpötila voisi pudota alemmas lämmittämällä vain otollisella hetkellä enemmän.

7. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia sääennusteiden hyödyntämismahdollisuuksia rakennusten energiakustannusten minimoinnissa. Myös sään vaikuttamista rakennuksen energiankulutukseen tutkittiin ja huomattiin sään vaikuttavan energiankulutukseen jonkin aikavakion mukaan. Sääennustetta hyödynnettiin yhdessä malliprediktiivisen säädön kanssa ja samalla myös tutustuttiin siihen. MPC-säätö on rakennusautomaation piirissä vähän käytetty ratkaisu, vaikka erään artikkelin mukaan aikaan saadut säästöt voivat olla jopa 50 % [19].

Aiheena tämä työ oli laaja ja sen vuoksi työssä täytyi tehdä selviä rajauksia. Työssä eniten aikaa vienyt osa eli rakennuksen käyttäytymistä kuvaava dynaaminen malli täytyi rajata yksinkertaiseksi kokonaisuudeksi. Koska mallia muodostaessa sitä jouduttiin rajaamaan, on sillä luultavasti jonkinlainen vaikutus saatuihin tuloksiin. MPC-säädössä yksi suuri tekijä on myös sääennusteen epävarmuus, joka on rajattu tässä työssä pois käyttämällä ennusteena tulevaa säätiladataa. Tärkeää on muistaa sääennustuksien epävarmuudesta, että niillä voi olla negatiivinen vaikutus MPC-säädön toimintaan [23].

Kirjallisuuden perusteella työn tuloksista oli odotettavissa selkeämpää säästöä MPC-säädön ja sääennusteen kanssa, mutta työssä saatu säästö jäi alle kahteen prosenttiin. Vaikka säästö ei ole suuri on sääennustetta hyödyntämällä mahdollista laskea energiakustannuksia rakennuksessa. Tämän työn laajuuden puitteissa pystyttiin luomaan alustava arvio menetelmän tehokkuudesta, mutta lopullisen tehokkuuden vahvistaminen vaatii kuitenkin lisää tutkimusta.

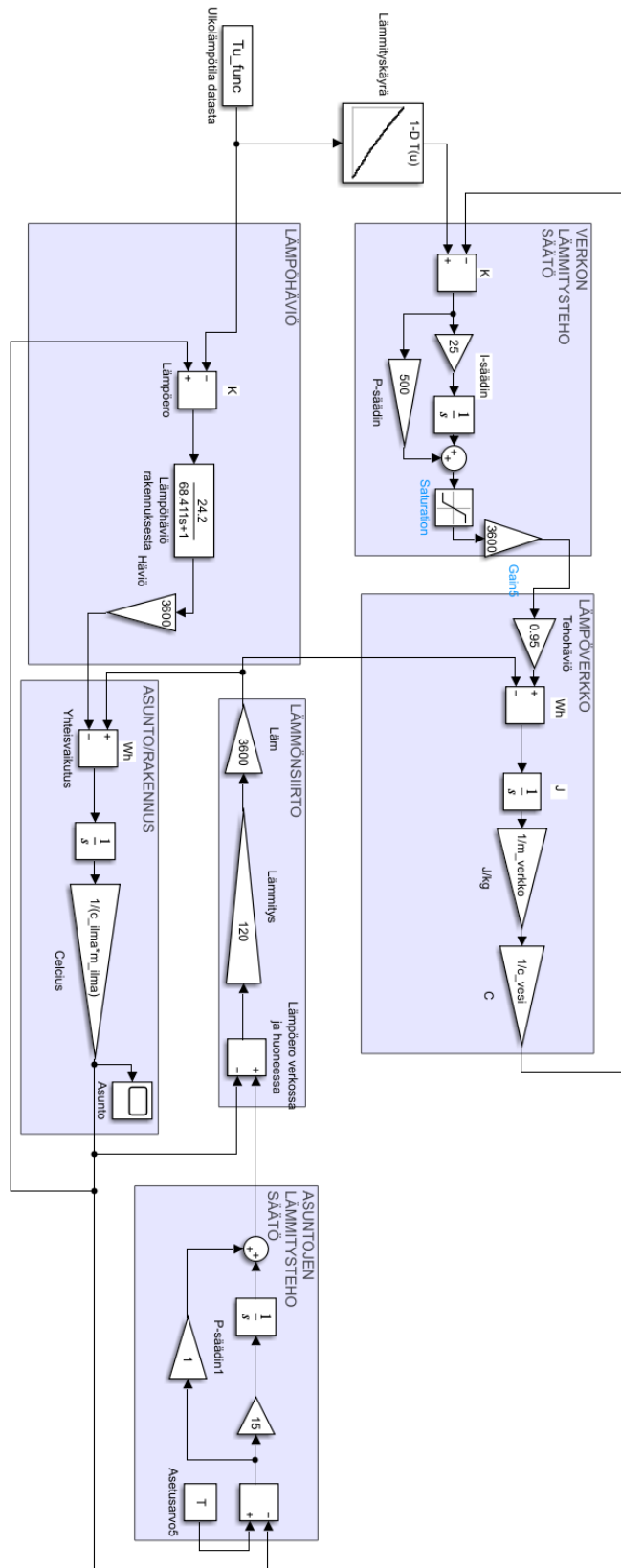
Työn aihe oli laaja, joten tämän työn tutkimuskysymyksiin ei pystytty vastaamaan täydellisellä tarkkuudella, mutta työn laajuuden huomioon ottaen siinä onnistuttiin hyvin. Työllä ja sen aiheella onkin paljon jatkokehitysmahdollisuuksia. Tämän työn pohjalle voitaisiin jatkaa mallin rakentamista tarkempaan suuntaan sekä itse MPC-säädön parantamista. Sääennusteeseen voisi implementoida myös auringonpaisteen vaikutuksen rakennukseen, mutta tämä tarvitsisi lisää ymmärrystä auringonpaisteen vaikutuksesta rakennuksen dynamiikkaan. Käytännön sovelluksia varten olisi myös mahdollista etsiä tapoja, miten mallia pystyttäisiin helposti parametrisoimaan, koska mallien parametrisoiminen voi olla raskas manuaalinen työ. Mallin parametrisoimiseen kuuluva työmäärä saattaa olla yksi rajoittava tekijä, miksi MPC ei ole vielä suosittu säätötapa suuresta potentiaalista huolimatta. Sääennusteiden epävarmuuden vaikutusta säätöön voisi myös tutkia lisää ja etsiä vastauksia, miten vähentää ennusteen epävarmuuden vaikutusta säätöön.

LÄHTEET

- [1] M. Lettenmeier, L. Akenji, ja V. Toivio, ”1,5 asteen elämäntavat”, 16.05.2019, [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/julkaisut/1o5-asteen-elamantavat/>
- [2] E. Peltoniemi, ”Tilastokeskus”. https://www.stat.fi/til/asyta/2020/asyta_2020_2021-06-16_tau_001_fi.html (viitattu 24. helmikuuta 2022).
- [3] Sähkötieto Ry, *Rakennusautomaatiojärjestelmät, ST-käsikirja 17*. 2018.
- [4] P. Pirinen, H. Simola, S. Nevala, P. Karlsson, ja R. Ruuhela, *Ilmastonmuutos ja lämmitystarveluku paikkatietoarvioina Suomessa*. Ilmatieteen laitos, 2014. Viitattu: 26. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/135722>
- [5] ”Kaukolämpötilasto 2019”. Energiateollisuus Ry. [Verkossa]. Saatavissa: https://energia.fi/files/5384/Kaukolampotilasto_2019.pdf
- [6] S. Sugarman, ”HVAC Fundamentals”.
- [7] *Maankäyttö- ja rakennuslaki 16.12.2016/1151, 117 g §*.
- [8] V. Rouhiainen, ”Asumisen energiankulutus”, *Tilastokeskus*, 2021. https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html (viitattu 28. helmikuuta 2022).
- [9] J. Virta ja P. Pylsy, *Taloyhtiön energiakirja*. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus, 2011.
- [10] T. A. S. Oy, ”Poistoilman lämmön talteenotto (LTO): toimintaperiaate ja säästöt | Tom Allen Senera”. <https://www.tomallensenera.fi/lammon-talteenotto> (viitattu 28. helmikuuta 2022).
- [11] O. Seppänen, *Rakennusten lämmitys*, 2. päivitetty p. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten liitto, 2001.
- [12] Integrio, ”Integrion materiaalit”, 14. maaliskuuta 2022.
- [13] T. Silver, ”Myyntijohtaja, Integrio Oy. Haastattelu”, 14. maaliskuuta 2022.
- [14] K. J. Aström, R. M. Murray, ja K. J. Astr M, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. New Jersey, UNITED STATES: Princeton University Press, 2010. Viitattu: 10. huhtikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=475844>
- [15] E. F. Camacho ja C. Bordons, *Model Predictive control*. London: Springer London, 2007. doi: 10.1007/978-0-85729-398-5.
- [16] Ilmatieteen laitos, ”Havaintojen lataus”, *Ilmatieteen laitos*. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi> (viitattu 5. huhtikuuta 2022).
- [17] Motiva, ”Vesikiertoinen lämmitys – ylläpito ja säätö”, *Motiva*. https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/hyva_ arki_ kotona/kodin_ saatolaitteet/vesikiertoinen_ lammitus_ _ yllapito_ ja_ saato (viitattu 6. huhtikuuta 2022).
- [18] Mathworks, ”Model Predictive Control Toolbox Documentation - MathWorks Nordic”. <https://se.mathworks.com/help/mpc/> (viitattu 12. huhtikuuta 2022).
- [19] J. Drgoňa ym., ”All you need to know about model predictive control for buildings”, *Annu. Rev. Control*, vsk. 50, ss. 190–232, 2020, doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.001.

- [20] Mathworks, "Choose Sample Time and Horizons - MATLAB & Simulink - MathWorks Nordic". <https://se.mathworks.com/help/mpc/ug/choosing-sample-time-and-horizons.html> (viitattu 13. huhtikuuta 2022).
- [21] Mathworks, "Simulate model predictive controller - Simulink - MathWorks Nordic". <https://se.mathworks.com/help/mpc/ref/mpcccontroller.html> (viitattu 26. huhtikuuta 2022).
- [22] Tampereen sähkölaitos, "Lähilämpö - hinnoittelu ja sopimusehdot". <https://www.sahkolaitos.fi/yrityksille-ja-taloyhtiaille/lamporatkaisut/hinnat-ja-sopimusehdot/> (viitattu 14. huhtikuuta 2022).
- [23] J. Hou, H. Li, N. Nord, ja G. Huang, "Model predictive control under weather forecast uncertainty for HVAC systems in university buildings", *Energy Build.*, vsk. 257, s. 111793, helmi 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111793.

LIITE A: SIMULINK-MALLI



LIITE B: SIMULINK-MALLI MPC

