

**UNIVERSITY
OF OULU**

MALLIN KUVAUS JA VERIFIOINTI

LOPPURAPORTTI EAASLAB-PROJEKTILLE

Hybridilaboratorion kaukolämpöverkon digitaalinen malli

Tekijät:

Markus Neuvonen, István Selek

Älykkäät koneet ja järjestelmät,
Oulun Yliopisto

Status:

Draft

May 31, 2021

1 Digitaalisen mallin tavoite

OAMK:n tiloihin on rakennettu uusi hybridilaboratorio opetuskäyttöön. Tässä raportissa käydään läpi hybridilaboratorion kaukolämpöverkon osasta tehty digitaalinen malli.

Malli on tarkoitettu käytettäväksi opetuksen tukena. Erityisesti siten, että opiskelija voi tutustua kaukolämpöverkon dynamiikkaan jo ennen laboratoriotöiden aloittamista. Mallin tulee toistaa järjestelmän dynamiikka oikeasuuntaisesti. Mallin tulee olla myös helposti käytettävä, sillä opiskelijat käyttävät sitä itsenäisesti.

1.1 Mallinnuksen periaatteet

Malli toteutetaan Simscape-ohjelmistoympäristössä, joka on osa Matlabin Simulink-ympäristöä. Simscape on kehitetty ajatellen fysikaalisten mallien tekemistä, joten se on intuitiivinen käytettävä ja jokaiselle komponentille on olemassa selkeä dokumentaatio. Simscape-toteutuksen haasteena on mallin monimutkaisuuden lisääntyessä nopeasti kasvava laskentatehon tarve. Onkin tarkoituksenmukaista tehdä mahdollisimman yksinkertainen malli jossa tärkeimmät dynamiikat ovat edelleen havaittavissa. Yksinkertaistuksina mallista on jätetty kokonaan pois aurinkokeräinten ja ilmajäähdytyksen piirit. Oikean kaukolämpöjärjestelmän valvomonäkymä, johon merkattuna mallista kokonaan pois jätettävät osiot, on nähtävissä kuvassa Figure 1.

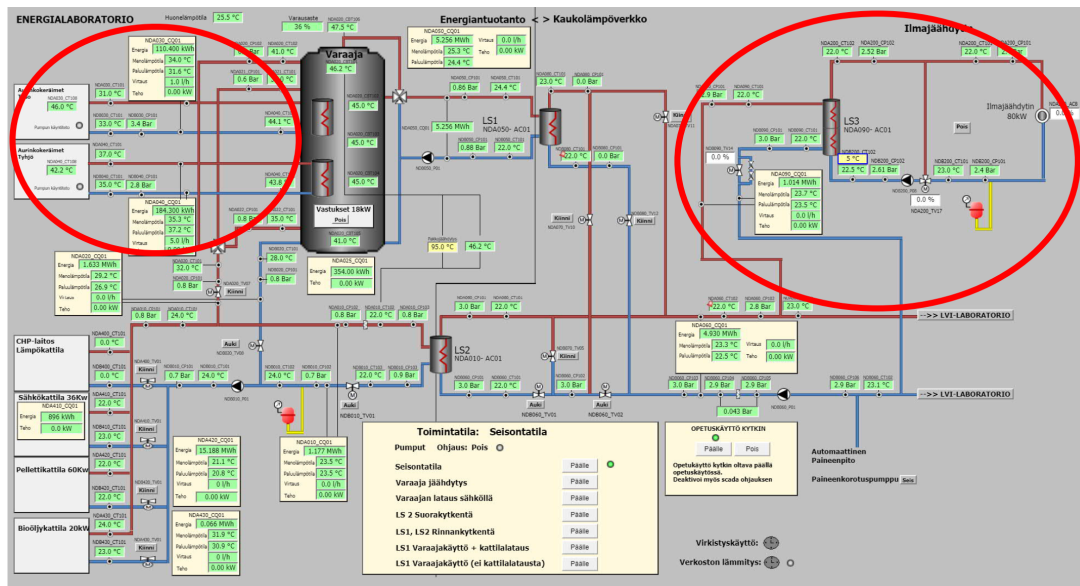


Figure 1: Valvomonäkymä automaatiojärjestelmästä, johon merkitty mallista kokonaan pois jätettävät osiot.

Tällä hetkellä digitaalisen mallin käynnistyminen koodin kääntämisineen vie tavanomaisella kannettavalla työtietokoneella noin kolme minuuttia. Itse simulointi tapahtuu varsin nopeasti, mutta silloin tällöin prosessorin ylikuormittuminen aiheuttaa "Ei vastaa" tilan.

1.2 Mallin käyttöliittymä

Simscape-ympäristöön on luotu fyysisen järjestelmän valvomonäkymää vastaava käyttöliittymä. Näin ohjaukskäskyjen antaminen ja "reaaliaikaisten" arvojen lukeminen on suoraan verrannollista oikean järjestelmän käyttämiseen. Fyysisen järjestelmän valvomonäkymä on jaettu kahteen osaan; Energialaboratorioon (Figure 1) ja LVI-laboratorioon (Figure 2).

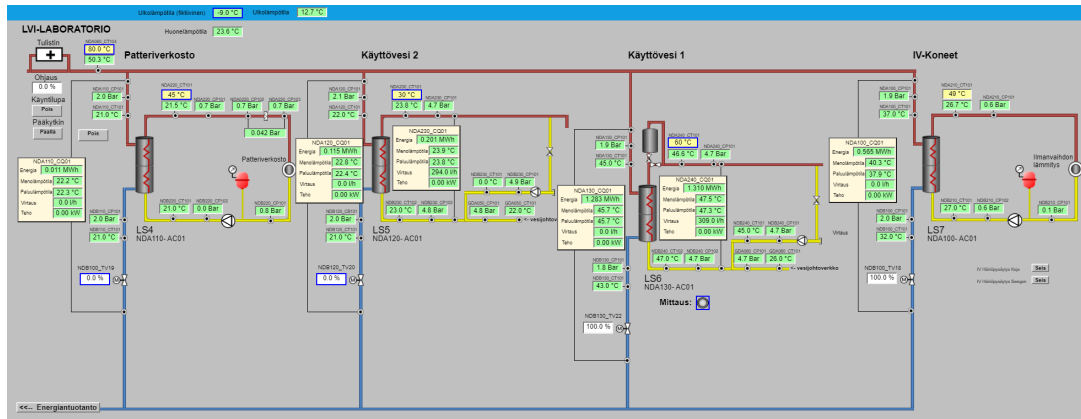


Figure 2: LVI-laboratorion valvomonäkymä automaatiojärjestelmästä.

Digitaalisen mallin valvomonäkymä jaetaan vastaavalla tavalla kahteen osaan. Näkymät on esitetty kuvassa Figure 3 ja Figure 4.

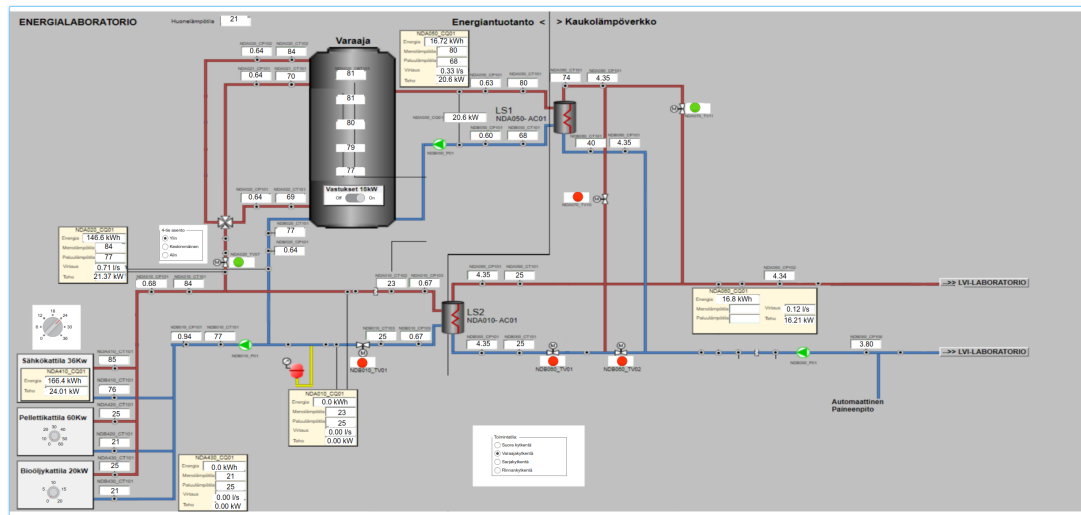


Figure 3: Energialaboratorion valvomonäkymä digitaalisesta mallista.

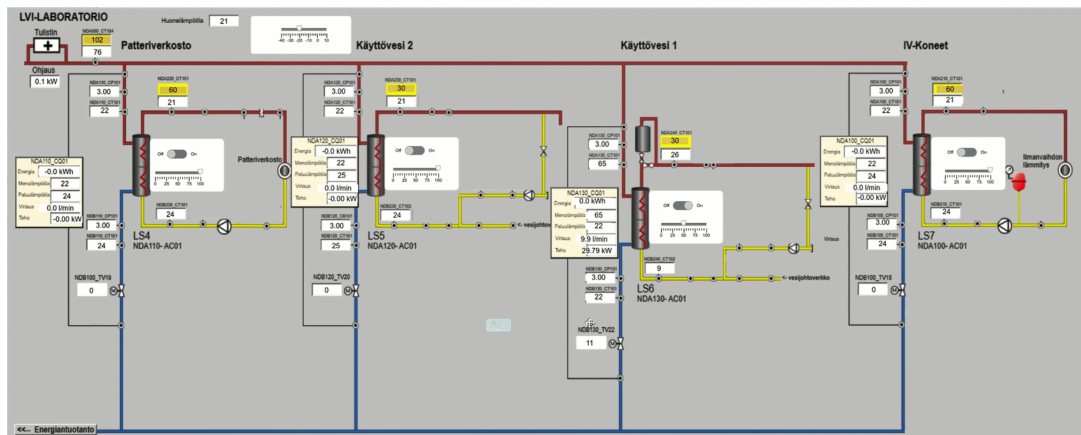


Figure 4: LVI-laboratorion valvomonäkymä digitaalisesta mallista.

Reaaliaikaisen valvomonäkymän lisäksi mallissa on mahdollista tarkastella jokaisen prosessin osan kaikkien tilamuuttujien trendejä simuloinnin päätyttyä. Esimerkki tästä on nähtävissä kuvassa Figure 5.

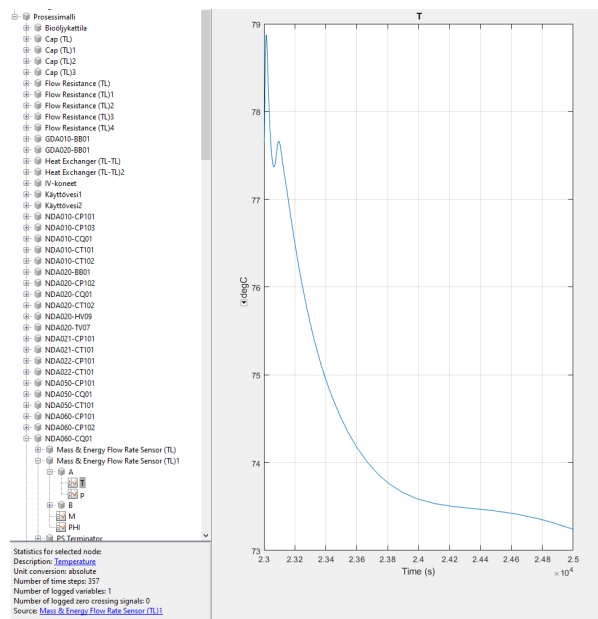


Figure 5: Esimerkki simuloinnin jälkeen nähtävissä olevista kuvaajista.

Opiskelijoiden oletetaan käyttävän mallista vain valvomonäkymää ja jossain määrin lopun trendejä. Muu käyttö vaatii taustatietoja niin Simscape-ympäristöstä kuin itse kaukolämpöjärjestelmästäkin. Yksityiskohtaisemmin mallin käyttöä voidaan esitellä opastevideoiden avulla.

2 Digitaalisen mallin kuvaus

Digitaalisen mallin laitteistot, liitännät ja instrumentoinnit on rakennettu perustuen prosessikaavioihin v1-0 ja v1-13. Prosessikaavion mukainen järjestelmän fyysinen rakenne toistetaan digitaalisessa mallissa.

2.1 Mallin toimintaperiaate

Simscape-ympäristössä saatavilla olevia valmiita peruselementtejä yhdistelemällä saadaan aikaan mallinnettavan järjestelmän fyysikaalinen esitys matemaattisen sijaan. Fysikaalisesta esitysmuodosta on visuaalisesti helppo löytää yhtäläisyydet hybridilaboratorion vastaaviin fyysisiin osiin. Simscape hoitaa matemaattisen puolen automaattisesti muodostamalla yhdistettyjen kappaleiden välille luonnonlakien mukaiset differentiaaliyhtälöt. Simulink-ympäristöstä poiketen muuttujilla ei ole etenemissuuntaa, vaan simuloidessa yhtälöt ratkaistaan "molempiin suuntiin".

2.1.1 Interaktiiviset muuttujat

Olennoisimmat prosessimuuttujat on tehty simulaatioajon aikana mallin valvomonäkymästä interaktiivisesti muutettaviksi. Simuloija toimii siis aivan kuten operaattori toimii fyysisessä järjestelmässä. Interaktiivisiksi tehdyt muuttujat ovat:

1. Kunkin kolmen tuottajan teho
2. Varaajan sähkövastukset on/off
3. Kunkin neljän kuluttajan teho
4. Ajotilan säätö (verkon on/off -venttiilien asento)
5. Fiktiivinen ulkolämpötila (vaikuttaa lämpötilojen asetusarvoihin)
6. Varaajan lämmittämisen nelitieventtiilin asento

Muutettavissa olevat järjestelmän arvot on toteutettu osana mallin valvomonäkymää (Figure 3 ja Figure 4) kääntönappeina, liukuvalitsimina ja kytkiminä.

2.2 Mallin osat

Digitaalinen malli on toteutettu fyysikaalisten peruselementtien avulla. Valtaosa mallista, kuten esimerkiksi putkisto (Figure 6), vaatii vain muutaman peruselementin yhdistämisen.

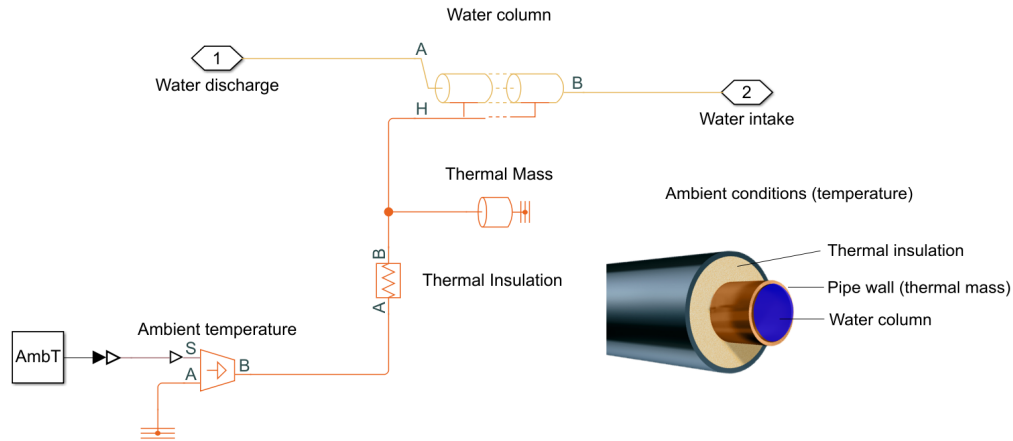


Figure 6: Esimerkki valmiiden Simscape-komponenttien yhdistelystä.

2.2.1 Lämpövaraaja

Lämpövaraajassa tapahtuvaa veden kerrostumista ei saada suoranaisesti mallinnettua. Auttavasti kerrostumista jäljittelevä toiminnallisuus on saatu aikaan jakamalla vesimassa viiteen pienempään osaan. Esimerkiksi varaajan lämmityksen nelitieventtiilin asentoa muuttamalla on mahdollista havainnoida kerrostumisen kaltaista dynamiikkaa.

2.2.2 Kuluttajat

Kuluttajat ovat yksi interaktiivisista muuttujista. Kuluttajia ei kuitenkaan ole varsinaisesti mallinnettu. Kaukolämpöverkon rajapintana toimivien lämmönvaihtimien sekundääripuolet on toteutettu erittäin yksinkertaisina veden pumppauksina varastoaltaasta toiseen. Kuluttajien laitteista tai toiminnallisuuksista ole tarkkoja tietoja.

2.3 Säättöpiirit

Järjestelmässä on useita säättöpiirejä, joiden toiminta ei ole tarkasti tiedossa. Mallissa säätimet on toteutettu suuntaa-antavasti. Esimerkkejä tällaisista ovat:

1. Koeajojen aikana sähkökattilan ulostulolämpötilassa havaittiin olevan rajoitin. Rajoitin toteutettu PID-säätimellä mallissa.
2. Vesivaraajan sähkövastuksissa tehoportaita 4,5 kW:n välein. Mallissa portaita ei toteutettu, vaan 18 kW:n vastukset toimivat on/off periaatteella.
3. Järjestelmässä olevien säättöventtiilien ja lisälämmitystyristorin PID-säädöt toteutettu mallissa suuntaa-antavien parametrein.

3 Verifiointi

Mallin verifioidaan vertailemalla simuloimalla saatavia tuloksia oikean järjestelmän tuottamaan dataan vastaavissa ajo-olosuhteissa. Kuten mallinnuksen tavoitteenasettelussa todettiin, tarkoitus on saada näkyville samansuuntaisia dynaamisia muutoksia. Tarkoitus ei siis ole saada kaikkia paineita, virtauksia, lämpötiloja jne. absoluuttisesti samoihin arvoihin.

Verifiointia hankaloittaa kesken olevat hybridilaboratorion käyttöoikeusneuvottelut. Tällä hetkellä yliopiston henkilökunnalla ei ole mahdollisuutta olla laboratoriossa tekemässä järjestelmän koeajoja. OAMK:n Mikko Mielityinen on tehnyt kaksi järjestelmän askelvastekoetta mallin verifiointia ajatellen. Näiden kokeiden ajalta tietokantaan tallentunut mittausdata on käytettävissä etäyhteydellä.

Kaiken kaikkiaan järjestelmän käyttöönotto on vielä alkuvaiheessa. Lämpöverkon kaikkia toiminnallisuuksia ja tallennettavia datapisteitä ei ole tarkistettu. Sekä toiminnassa, että mittauksissa on vielä epäselvyyksiä. Tarkkuus on kuitenkin riittävä opetuskäyttöön tulevalle mallille.

3.1 Koeajot

Hybridilaboratoriossa on ajettu kaksi koeajoa, ensimmäinen 11.5.2021 ja toinen 17.5.2021. Digitaalisen mallin dynamiikan verifiointi toteutetaan näistä koeajoista saatuun dataan verraten. Suoritetuista koeajoista on toimitettu seuraavat tiedot:

- Koeajo 1: Huoneenlämpöisessä järjestelmässä päälle sähkökattila 24 kW teholla ja varaajan sähkövastukset aktivoituna klo 6.00. Käyttövesi 1 kulutus päälle 23 kW teholla klo 12.25-12.50.
- Koeajo 2: Järjestelmän lämmittäminen alkaa klo 7.00. Käyttövesi 1 kulutus päälle 55 kW teholla klo 10.25-11.00.

3.2 Koeajo 1, Testi 1

Sähkökattilan kyky lämmittää sen läpi virtaavaa vettä ja vesivaraajan lämpötilat esitetty kuvaajissa Figure 7 ja Figure 8. Simuloinnissa on oletettu järjestelmän olevan varaajakytkennässä ja varaajasyötön nelitieventtiilin yläasennossa. Aurinkopaneelien mahdollinen lämmitysteho ei ole mukana simulaatiossa.

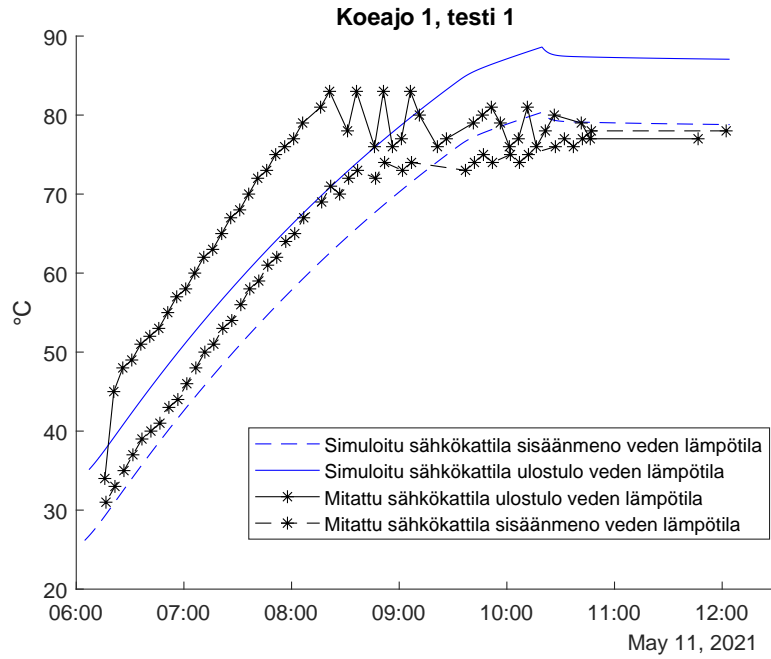


Figure 7: Sähkökattilan sisäänmeno- ja ulostulolämpötilat.

Mallissa ja koeajossa lähtölämpötilat ovat hieman erit. Sähkökattilan (tuntematon) sisäinen rajoitin toimii selvästi eri periaatteella fyysisessä järjestelmässä ja mallissa. Muutoin toiminnassa nähtävissä selkeä vastaavuus.

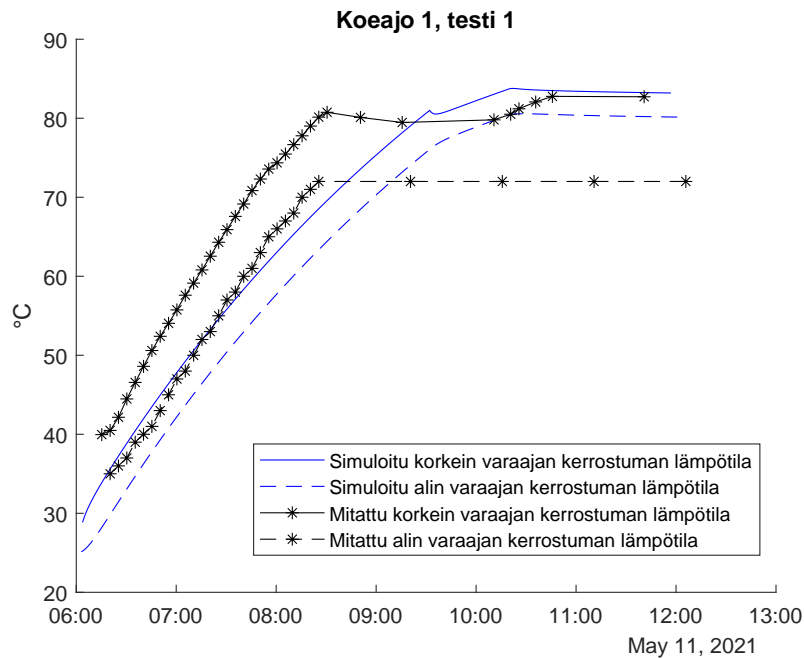


Figure 8: Varaajan lämpimimmän ja kylmimmän kerrostuman lämpötilat.

Järjestelmien lähtölämpötila on jälleen hieman eri. Lämpökerrostuminen näkyy melko hyvin mallissa toteutetulla vesimassan osiin jaolla. Varaajan kerrostumien lämpötilamittauksissa ilmenee toimintavika, joka jäädyttää osan arvoista kokeen aikana.

3.3 Koeajo 1, Testi 2

Lämmenneessä järjestelmässä lisätään askelmaisesti kulutusta. Simuloidessa oletettu tyristorilämmittimen asetuslämpötilaksi 80 astetta. Ilmajäähdytyspiiri on jätetty kokonaan mallintamatta. Kuluttajien toisiopiirejä ei ole mallinnettu todellisuutta vastaavasti.

Koeajoissa järjestelmä ei ole vakio-tilassa, sillä LVI-laboratorion IV-laitteiden kulutus käy purskeittain päällä koko koejärjestelyn ajan, kuten kuvaajasta Figure 9 nähdään. Simuloinnissa tällaiset häiriöt jätetään huomioimatta ja oletetaan järjestelmän olevan vakio-tilassa. Mitattujen ja simuloitujen kuluttajan lämpötilojen ja tehon vertailu on nähtävissä kuvaajassa Figure 10.

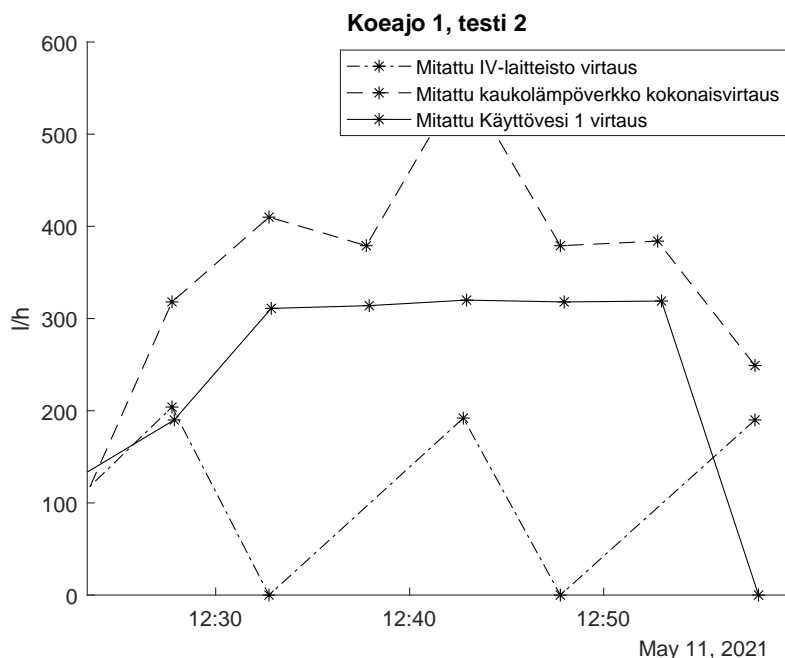


Figure 9: Mitattuja virtauksia.

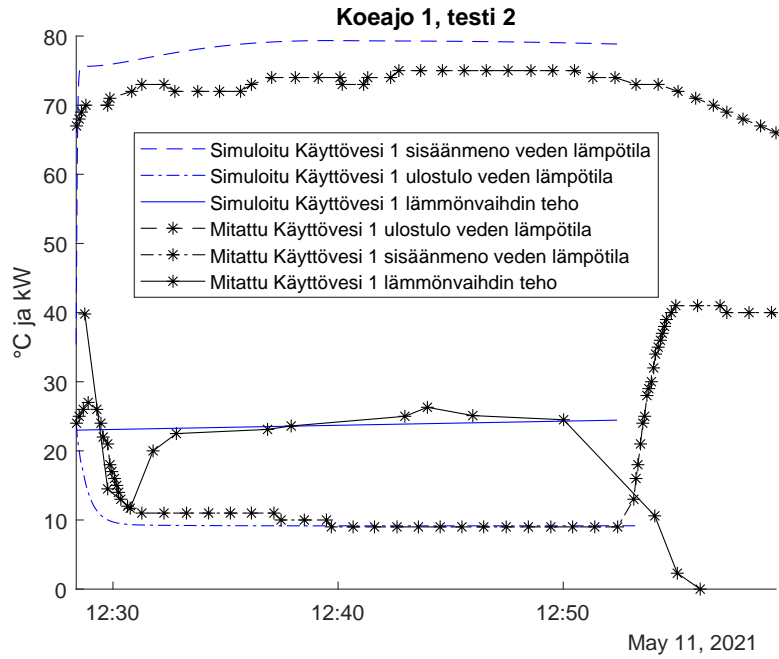


Figure 10: Käyttövesi 1 kuluttajan lämpötilaero ja teho.

Mitattu ja simuloitu kuluttajan käyttäytyminen vastaavat toisiaan. Ainoastaan kuluttajalle tulevan lämpimän veden asetusarvo on ilmeisesti hieman eri.

3.4 Koeajo 2, Testi 1

Koeajo 2 on käytännössä sama kuin koeajo 1, mutta hieman suuremmalla kulutuksen askelmuutoksella. Tarkastellaan samalla tavalla saatuja kuvaajia mitatuista ja simuloituista arvoista. Järjestelmän lämmittämisen liittyvät simuloitut ja mitatut arvot on nähtävissä kuvaajassa Figure 11.

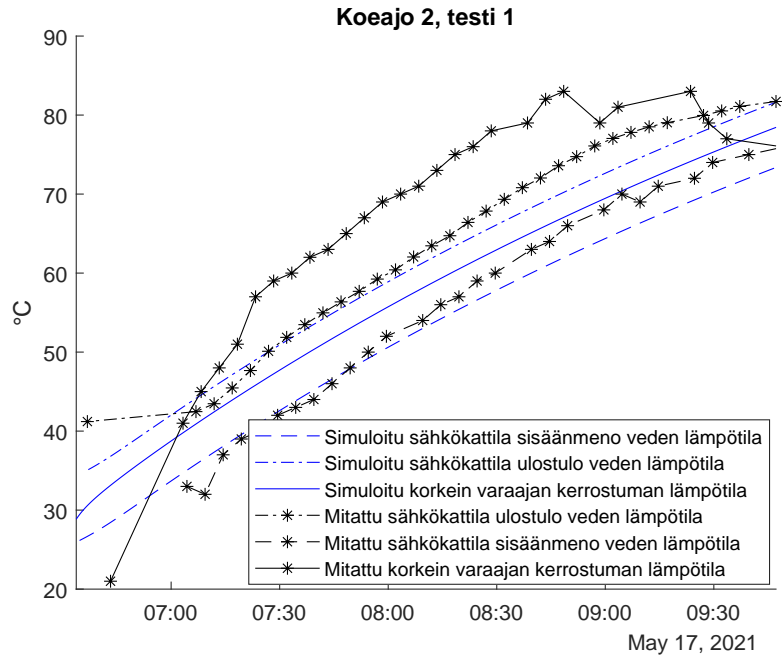


Figure 11: Varaajan lämmitys sähkökattilalla.

Arvot vastaavat toisiaan hyvin. Mitattu kattilan korkein kerrostumalämpötilä tosin nousee huomattavasti nopeammin kuin simuloitu vastaava.

3.5 Koeajo 2, Testi 2

Kulutuksen askeltestesti. Kuluttajan Käyttövesi 1 simuloituja ja mitattuja arvoja on nähtävissä kuvaajassa Figure 12.

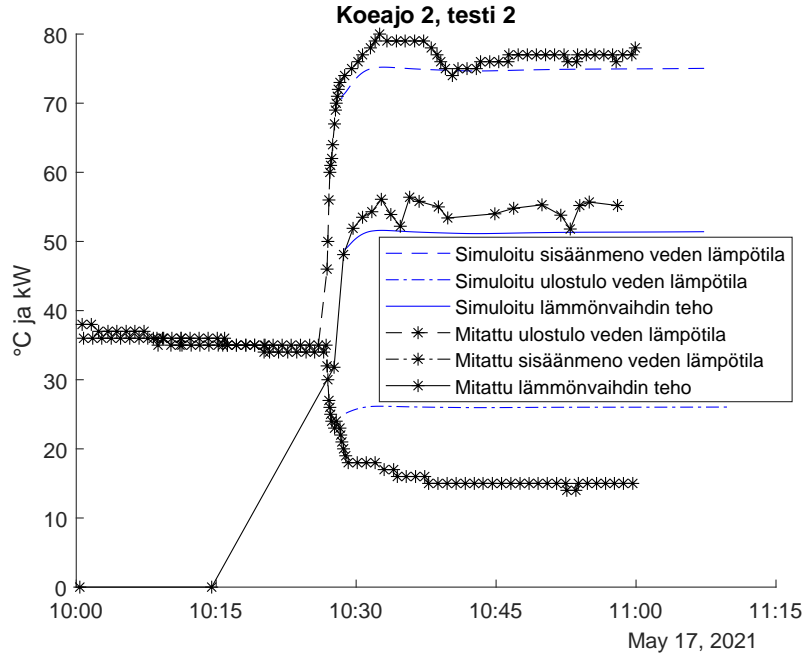


Figure 12: Käyttövesi 1 kuluttajan lämpötilaero ja teho.

Maksimikulutuksella eroavaisuutta on havaittavissa lämmönvaihtimen toiminnassa. Simuloinnissa ulostulevan veden lämpötila selvästi mitattua korkeampi.

4 Jatkokehitys

Mikäli mallin tulevasta opetuskäytöstä olisi tarkemmat tiedot, voitaisiin osuvuus virittää olennaisissa toimintatiloissa tarkaksi. Tällä hetkellä malli on yleisellä tasolla fyysistä järjestelmää vastaava, ja virittämistä on käytännössä tehty vain koeajoista saadulla datalla.

Mallin parametrisointia voi yleisestikin aina parantaa. Esimerkiksi kattilapiirissä mallin paineet ja virtaukset poikkeavat mitatuista (kuvaajat Figure 13 ja Figure 14). Parametrien tarkentaminen vaatisi myös kattavasti koeajoja erilaisissa olosuhteissa. Tarkkuus on kuitenkin varmasti riittävä opiskelijoiden järjestelmään tutustumista varten.

Kuluttajien toiminnallisuuden lisääminen voisi olla mielenkiintoista, mikäli niitä opetuskäytössä tullaan tarkastelemaan. Tarkasti mallinnettujen kuluttajien ja kaukolämpöverkon yhteistominnan simuloiminen voisi tuoda merkittävän lisän opiskelijoiden laboratoriokokeisiin valmistautumiseen.

Järjestelmässä on useita säätöpiirejä, joiden tarkka toiminnallisuus ei ole tiedossa. Mallin tarkkuutta voitaisiin lisätä selvittämällä järjestelmän säätöpiirien parametrit ja implementoimalla ne. Mallia voisi olla mahdollista käyttää myös säätidinsuunnittelun opetukseen.

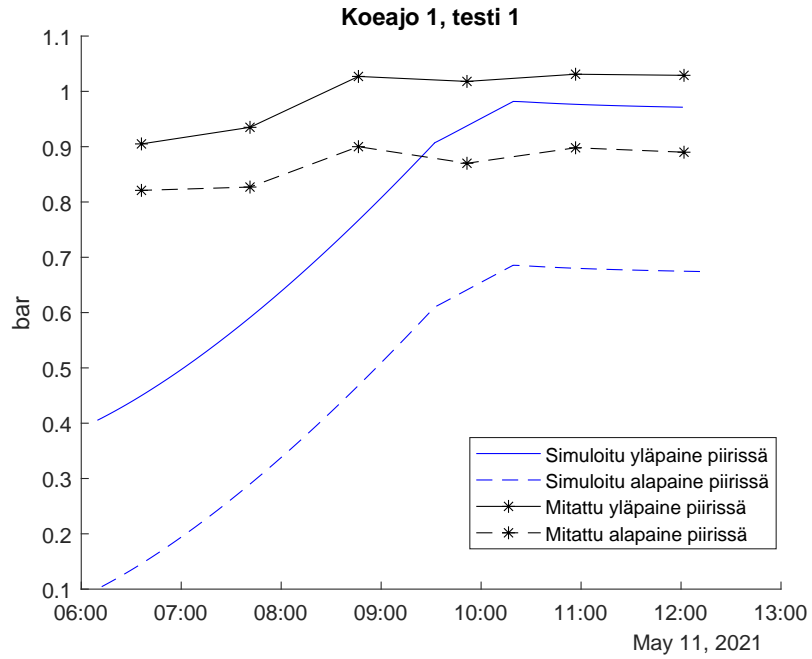


Figure 13: Varaajanpiirin paineita.

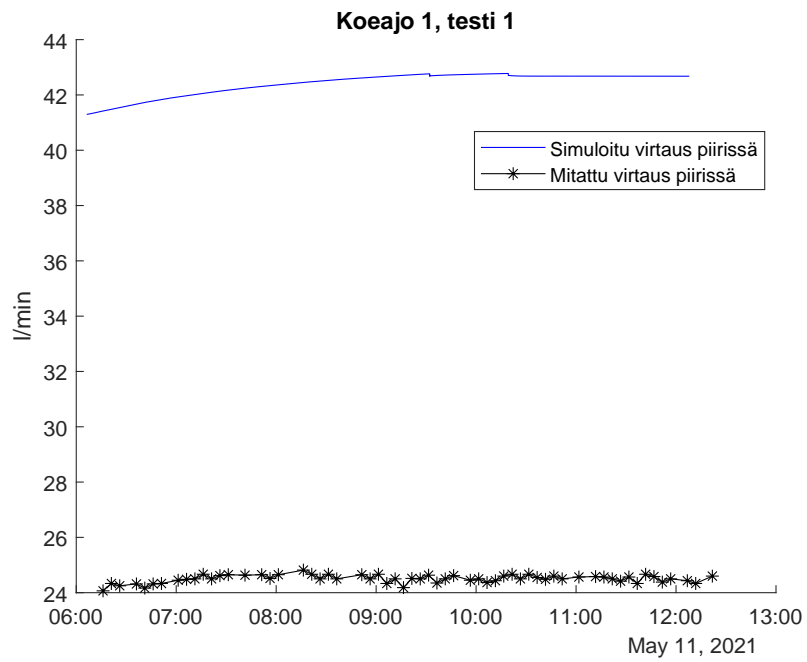


Figure 14: Varaajapiirin virtaukset.