



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Dynaamisen lämmönsiirtomallin kehittäminen

Development of dynamic heat exchange model

Markus Järvisalo

Kandidaatintyö
LUT Energia
Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Markus Järvisalo

Dynaamisen lämmönsiirtomallin kehittäminen

2012

Kandidaatintyö.

29 sivua, 17 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijatohtori, TkT Antti Kosonen

Hakusanat: Dynaaminen, hyötysuhdemittapaikka, kalorimetri, lämmönsiirtomalli

Dynaamisia simulointimalleja tarvitaan, jotta voidaan tarkastella järjestelmän käyttäytymistä ajan funktiona. Simulointimallilla voidaan simuloida järjestelmän lähtö erilaisilla herätteillä. Mallin avulla saadaan myös tarkempi käsitys järjestelmästä ja sen osa-alueista, koska simulointimallista voidaan tarkastella sellaisia asioita, jotka voivat olla oikeasta järjestelmästä vaikeasti mitattavia. Tässä työssä kehitetään LUT Energian hyötysuhdemittapaikan keskikokoista kalorimetriä approksimoiva dynaaminen lämmönsiirtomalli käyttäen Matlab[®] Simulink -ohjelmistoa. Kehitetyn lämmönsiirtomallin tarkkuutta arvioidaan todellisella järjestelmällä tehdyillä mittauksilla. Työssä käytetään karkeita approksimaatioita, jotka tulee korvata tarkemmilla matemaattisilla malleilla jatkokehitystä varten. Työssä kehitetty dynaaminen lämmönsiirtomalli approksimoi todellisen järjestelmän vastetta lämmitysvaiheessa keskimääräisenvirheen $\pm 0,19$ °C tarkkuudella.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Markus Järvisalo
Development of dynamic heat exchange model

2012

Bachelor's Thesis.
29 pages, 17 figures, 1 table

Examiner: Antti Kosonen, Post doctoral researcher, D.Sc. (Tech.)

Keywords: Calorimetric, dynamic, energy efficiency measurement place, heat exchange model

Dynamic simulation models are required to analyze the behaviour of a specific system as a function of time. The model can simulate the system output with different inputs. By creating these kinds of models we can also gain a more defined understanding about different subparts of the system because you can observe parts of the simulated system that would be hard or impossible to measure from the real system. In this bachelor's thesis work a dynamic heat exchange model is developed to approximate a mid-size calorimeter from LUT Energy department's efficiency measurement place using Matlab[®] Simulink software. The accuracy of the developed dynamic heat exchange model is verified by using measurements from the real system. Crude approximations were used in the development of this model and those should be replaced by mathematical models in the next stage of development of this model. The developed heat exchange model approximates the real system with a mean error of $\pm 0,19$ °C in the heating phase.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

Roomalaiset symbolit

A	lämmönsiirtopinta-ala [m^2]
\bar{c}	molekyylien keskinopeus [m/s]
C_p	ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
\bar{C}_p	kostean ilman keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
D	kappaleen säde [m]
g	putoamiskiihtyvyyys [$9,81 \text{ m/s}^2$]
h	konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
k	materiaalin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
L	kappaleen karakteristinen pituus [m]
l	nesteestä riippuva kokeellinen vakio
m	massa [kg]
\dot{m}	massavirta [kg/s]
n	molekyylien määrä tilavuusyksikössä
Nu	Nusseltin luku
Pr	Prandtlin luku
Q	lämpöenergia [J]
q	lämpöteho [W], lämmönsiirtonopeus
Ra	Rayleigh'n luku
T	lämpötila [K]
ΔT	lämpötilaero [K]
T_s	pinnan lämpötila [K]
T_∞	ympäristön lämpötila [K]
$\frac{\partial T}{\partial x}$	lämpötilagradientti lämmönsiirron suuntaan
U	lämmönläpäisykerroin [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
ν	kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

Kreikkalaiset symbolit

α	lämmönsiirtokerroin [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
$\alpha_{f,\text{vap}}$	konvektiokerroin sylinterimäiselle kappaleelle [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
β	tilavuuden lämpölaajenemiskerroin [$1/\text{K}$]
ε	emissiokerroin
η	viskositeetti [$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$]
ρ	tiheys [kg/m^3]
σ	Stefan-Boltzmann vakio [$5,6704 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$]
λ_p	molekyyliden keskimääräinen vapaa polku [m]
λ	lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
λ_f	fluidin lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	4
1 JOHDANTO.....	7
2 LÄMMÖNSIIRRON PERUSTEET.....	8
2.1 Konduktio.....	8
2.2 Konvektio.....	9
2.3 Säteily.....	11
3 DYNAAMINEN JÄRJESTELMÄ.....	12
3.1 Järjestelmä.....	12
3.2 Lohkokaaviot.....	12
3.3 Staattisen ja dynaamisen järjestelmän määrittelmä.....	13
4 DYNAMIIKAN SYNTY LÄMMÖNSIIRTOJÄRJESTELMÄSSÄ.....	14
5 MALLINNETTAVA JÄRJESTELMÄ.....	16
6 DYNAAMISEN LÄMMÖNSIIRTOMALLIN RAKENTAMINEN.....	18
6.1 Mallin käyttäminen.....	20
6.1.1 Lämmitettävä kappale.....	21
6.1.2 Ilman ominaisuudet.....	22
6.1.3 Kammion ominaisuudet.....	22
6.1.4 Ympäristön olosuhteet.....	23
7 SIMULOINTITESTIT JA TULOKSET.....	24
8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	28
LÄHTEET.....	29

LIITTEET

Liite I	SI-järjestelmän johdannaisyksiköitä ja perusyksiköitä
Liite II	Dynaamisen lämmönsiirtomallin Simulink-malli
Liite III	Muuttujien arvot Matlabissa
Liite IV	Muuttuvat arvot eri tehoasteilla
Liite V	Matlab-koodi

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan, kuinka voidaan kehittää dynaaminen lämmönsiirtomalli, jossa ympäristön ilmanpaine, kosteus ja lämpötila sekä tuloilman tilavuusvirtaus voivat muuttua. Lämmönsiirtoa mallinnettaessa oppikirjoissa lähdetään liikkeelle aina siitä oletuksesta, että kappaleiden, kaasujen ja nesteiden lämpötilat tunnetaan. Näiden ympärille on johdettu ja rakennettu paljonkin yhtälöitä, joiden avulla voidaan ratkaista staattisen tilan ongelmia. Tämä on hyvä lähtökohta järjestelmäsuunnittelussa, jos halutaan, että tietyt raja-arvot eivät ylitä. Tämän työn yhteydessä on kuitenkin tarpeellista kehittää dynaaminen lämmönsiirtomalli, jonka avulla voidaan ratkaista lämpötilat tietyn ajan jälkeen, kun lähdetään liikkeelle tasapainotilasta ja järjestelmään tuodaan vakioiteho. Työn dynaaminen malli on toteutettu Matlab[®] Simulink -ohjelmistolla.

Työn lämmönsiirtomalli on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston hyötysuhdemittapaikassa olevan keskikokoisen kalorimetrin pohjalta. Tarkempi kuvaus kalorimetristä on esitetty lähteessä (A. Kosonen *et al.* 2013). Simulointimallia voidaan käyttää kalorimetrin säätimien virityksessä ja ilmanominaisuuksien muutosten aiheuttamien vaikutusten testauksessa. Lisäksi mallia on mahdollista hyödyntää ilmapuhaltimen mallipohjaisessa säädössä. Ilmapuhallinta käytetään pitämään lähtölämpötila vakiona. Paremmalla säädöllä on mahdollista minimoida nykyisellä säädöllä esiintyvää huojuntaa lähtölämpötilassa. Mallia on myös mahdollista hyödyntää järjestelmän ja ulkopuolisten tekijöiden, kuten ilmanominaisuuksien, aiheuttamien virheiden tarkastelussa.

Työn toisessa kappaleessa käydään läpi termodynamiikan perusteita konduktion, konvektion ja säteilyn osalta. Kolmannessa kappaleessa tutustutaan dynaamisten mallien ominaisuuksiin, vaatimuksiin sekä dynaamisen ja staattisen järjestelmän määritelmään. Neljännessä kappaleessa tarkastellaan miten aineominaisuudet ja massa vaikuttavat lämmönsiirtojärjestelmän dynamiikan syntyyn. Viidennessä kappaleessa esitellään mallinnettava järjestelmä. Kuudennessa kappaleessa kehitetään keskikokoista kalorimetria approksimoiva dynaaminen lämmönsiirtomalli. Seitsemännessä kappaleessa vertaillaan simuloidun järjestelmän vastetta todellisen järjestelmän vasteeseen. Kahdeksannessa kappaleessa käydään läpi yhteenveto.

2 LÄMMÖNSIIRRON PERUSTEET

Lämmönsiirtoa kappaleesta toiseen voi tapahtua kolmella eri tavalla: konduktiolla (johtamalla), konvektiolla (virtaamalla) tai säteilemällä. Lämpöenergia on atomeihin varastoitunutta värähtelyliike-energiaa, joka pyrkii tasoittumaan ympäristön vallitseviin olosuhteisiin. Konduktiossa värähtelyliike-energia pääsee siirtymään kappaleiden pintojen kitkan vaikutuksesta tai kappaleen sisällä atomisidosten välityksellä. Konvektiossa virtaava kaasu tai neste varaa itseensä lämpöenergiaa ja kuljettaa sen järjestelmän ulkopuolelle. Säteilylämmönsiirtoa tapahtuu, kun kappaleen atomit värähdellessään vapauttavat energiaa fotoneina.

Vapaa energiansiirto tapahtuu aina korkeammasta energiatilasta matalampaan. Mikäli kaksi järjestelmää on samassa energiatilassa, niiden välillä ei tapahdu energiansiirtoa.

Eri materiaaleille on määritelty kokeellisesti niiden sitoma energia massayksikköä kohden. Tätä kutsutaan ominaislämpökapasiteetiksi, jonka yksikkö on $[J/(K \cdot kg)]$. Kappaleen sisältämä lämpöenergia vertailukohdan lämpötilaan nähden on

$$Q = C_p m \Delta T, \quad (2.1)$$

missä Q on lämpöenergia, C_p kappaleen ominaislämpökapasiteetti, m kappaleen massa ja ΔT lämpötilaero kappaleen ja vertailukohdan välillä.

2.1 Konduktio

Konduktiota, eli lämmönjohtumista tapahtuu, mikäli kiinteässä kappaleessa esiintyy lämpötilaero. Kappaleessa esiintyy silloin energian siirtoa korkeammasta lämpötila-alueesta matalampaan lämpötila-alueeseen, koska energia pyrkii aina kohti energiaminimiä. Sanoetaan, että energia siirtyy tässä tapauksessa konduktiolla, eli johtamalla kappaleen läpi. Lämmönsiirtonopeus pinta-alayksikköä kohden on verrannollinen lämpötilagradientin normaaliin lämmönsiirron suuntaan

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.2)$$

missä q on lämmönsiirtonopeus $\frac{dQ}{dt}$ eli lämpöteho, A lämmönsiirron pinta-ala ja $\frac{\partial T}{\partial x}$ lämpötilagradientti lämmönsiirron suuntaan. Kun suhteellisuusvakio otetaan huomioon, voidaan lämmönsiirto johtumalla esittää seuraavasti

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.3)$$

missä k on materiaalin lämmönjohtavuus. Miinusmerkki on lisätty, jotta termodynamiikan toinen sääntö täyttyy; lämmön on siirryttävä lämpöasteikolla alaspäin.

2.2 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan yleisesti kaasun tai nesteen virtauksen mukana kuljettamaa energiaa. Konvektio voidaan jakaa vielä kahteen luokkaan: luonnolliseen konvektioon ja pakotettuun konvektioon. Luonnollisessa konvektiossa fluidi (kaasu tai neste) liikkuu lämpenemisen aiheuttaman nosteen vaikutuksesta tai painovoiman vaikutuksesta. Pakotetussa konvektiossa fluidia liikutetaan, esimerkiksi puhaltimen avulla, haluttuun suuntaan, halutulla nopeudella.

Konvektion lämpöenergiaa laskettaessa tarvitaan muutamia yhtälöitä pinnan ja fluidin välisen energiasiirron mallintamiseen. Diffuusion mekanismit (satunnaiset fluidin molekyylien liikkeet) vaikuttavat huomattavasti vähemmän konvektion lämmönsiirtoon kuin kokonaisuuden liike. (Frank P. Incropera *et al.* 1985)

Fluideilla molekyylien väliset etäisyydet ovat huomattavasti suuremmat kuin kiinteillä aineilla ja molekyylien liike on huomattavasti satunnaisempaa kuin kiinteissä aineissa. Lämmönsiirto fluidissa onkin tyypillisesti paljon tehottomampaa kuin kiinteissä aineissa. (Frank P. Incropera *et al.* 1985)

Lämpötilan ja paineen vaikutus kaasun lämmönjohtavuuteen voidaan selittää kaasujen kiineettisen teorian avulla. Tämän teorian perusteella tiedetään, että lämmönjohtavuus on suoraan verrannollinen molekyylien määrään tilavuusyksikössä, molekyylien keskinopeuteen, ja keskimääräiseen vapaaseen polkuun, joka on keskimääräinen matka, jonka molekyyli kulkee, kunnes se törmää toiseen molekyyliin. Täten

$$k \propto n\bar{c}\lambda_p, \quad (2.4)$$

missä n on molekyylien määrä tilavuusyksikössä, \bar{c} molekyylien keskinopeus ja λ_p molekyylien keskimääräinen vapaa polku. Koska molekyylien keskinopeus kasvaa lämpötilan noustessa ja siten vähentää kaasun molekyylistä massaa, kaasun lämmönjohtavuus kasvaa, kun lämpötila nousee ja molekyylinen paino pienentyy. Muuttujat n ja λ_p ovat kuitenkin suoraan ja kääntäen verrannollisia kaasun paineeseen, joten kaasun lämmönjohtavuus on riippumaton paineesta. (Frank P. Incropera *et al.* 1985)

Nesteiden molekyylliset olosuhteet ovat paljon vaikeammin kuvattavissa, koska lämmönjohtavuuden fyysisiä mekanismeja nesteissä ei tunneta kovinkaan hyvin. Nesteiden lämmönjohtavuuden arvot ovat tyypillisesti taulukoitu lämpötilan funktiona.

Jotta voidaan laskea kuinka paljon energiaa on siirtynyt fluidin ja pinnan välillä, määritetään ensiksi lämmönsiirtokerroin α :

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}, \quad (2.5)$$

missä ρ on tiheys. Seuraavaksi määritellään Rayleigh'n luku, jonka avulla voidaan määrittellä konvektiokerroin sylinterimäiselle kappaleelle.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}, \quad (2.6)$$

missä Ra on Rayleigh'n luku, g putoamiskiihtyvyys, β tilavuuden lämpölaajenemiskerroin, T_s pinnan lämpötila, T_∞ ympäristönlämpötila, L kappaleen karakteristinen pituus ja ν kinemaattinen viskositeetti. Virtaus muuttuu turbulentiksi, jos lämpötilaerosta johtuva nostevoima kasvaa tarpeeksi suureksi viskositeettiin nähden. Turbulentin virtauksen rajaksi Rayleigh'n luvulle on määritetty $Ra = 10^9$ (J. P. Holman 1989). Konvektiokerroin sylinterimäiselle kappaleelle on

$$\alpha_{f,vap} = \frac{\lambda_f}{D} \left\{ 0,6 \frac{0,387Ra}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^{\frac{1}{6}}, \quad (2.7)$$

missä D on sylinterin halkaisija metreissä, λ_f fluidin lämmönjohtavuus ja Pr Prandtin luku

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} . \quad (2.8)$$

Konvektion lämpöteho voidaan laskea vapaan konvektion tapauksessa

$$q = \alpha_{f,vap} A \Delta T, \quad (2.9)$$

missä ΔT on kappaleen ja fluidin välinen lämpötilaero. Yleisesti voidaan kirjoittaa

$$q = h A \Delta T, \quad (2.10)$$

missä h on konvektion lämmönsiirtokerroin.

2.3 Säteily

Säteilylämmönsiirtoa tapahtuu aina, kun kappaleen lämpötila on yli absoluuttisen nolllapiste. Ideaalisen säteilijän lämpösäteilyenergia on:

$$E_b = \sigma T^4 , \quad (2.10)$$

missä E_b on säteilyenergia, σ Stefan-Boltzmann vakio ($5,6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$) ja T on kappaleen lämpötila kelvineinä. Alaindeksi b kuvaa sitä, että kyse on mustan kappaleen säteilyenergiasta. Musta kappale on ideaalinen kappale, jolla on seuraavat ominaisuudet.

1. Musta kappale absorboi kaiken säteilyn riippumatta sen aallonpituudesta tai suunnasta.
2. Yksikään kappale ei voi tarkastelulämpötilassa säteillä enempää energiaa kuin musta kappale.
3. Musta kappale lähettää säteilyä tasaisesti joka suuntaan.

(Frank P. Incropera *et al.* 1985)

3 DYNAAMINEN JÄRJESTELMÄ

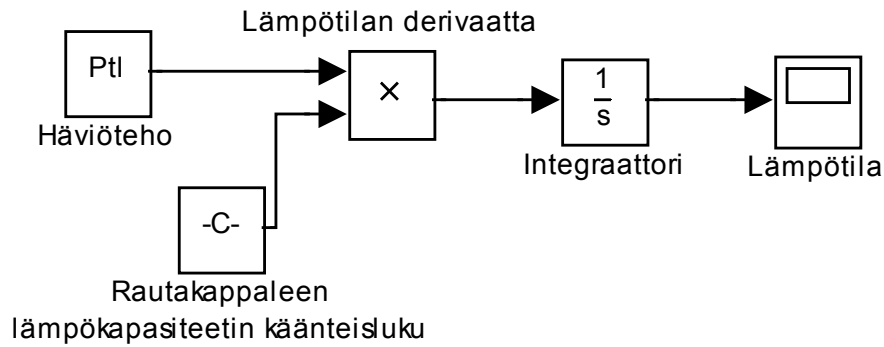
Tietokoneiden jatkuva laskentakapasiteetin kasvu on johtanut siihen, että dynaamisten järjestelmien mallintaminen ja simuloiminen on edullista ja tehokasta. Mallintamisen ja simuloimisen kasvu luo myös mahdollisuuden ymmärtää dynaamisia järjestelmiä paremmin, jotta niiden koko potentiaali voidaan hyödyntää parhaiten.

3.1 Järjestelmä

Termiä järjestelmä käytetään nykyisin paljon ja siten sen alkuperäinen käsitys on ehkä päässyt laimentumaan. ”Järjestelmä on yhdistelmä eri elementtejä, joiden tarkoitus on toimia yhdessä päämäärän saavuttamiseksi” (William J. Palm III 1983). Esimerkiksi sähkövastus on elementti, joka vastustaa sähkövirran kulkua, sitä ei yleensä kutsuta järjestelmäksi. Toisaalta, kun sitä käytetään osana verkkoa, joka koostuu useista vastuksista, kondensaattoreista ja keloista, silloin siitä tulee osa järjestelmää. Samoin auton moottori on järjestelmä, jonka osiksi voidaan laskea männät, sytyttimet, kaasutin ja niin edelleen. Edelleen korkeammalla tasolla voidaan ajatella moottorin olevan vain elementti järjestelmässä, jota voidaan kutsua autoksi. Kuten tästä huomataan, ja kuten luonnostakin voidaan havaita, mitään ei voida täysin eristää kaikesta muusta, joten järjestelmän rajat ja niiden määrittäminen riippuvat aina tutkimuksen tarkoituksesta ja sen asettamista rajoista.

3.2 Lohkokaaviot

Lohkokaavioesityksessä lohkot ovat järjestelmän elementtejä. Lohkoissa on yksi tai useampi tulo ja niissä voi myös olla yksi tai useampi lähtö riippuen lohkon sisällä tapahtuvista laskutoimituksista. Kuvassa 3.1 ensimmäinen lohko kuvaa häviötehoa, joka kerrotaan rautakappaleen lämpökapasiteetin käänteisluvun kanssa. Näiden lähtönä saadaan lämpötilan derivaatta. Seuraava lohko on integraattori, joka muuttaa lämpötilan derivaatan sen hetkiseksi lämpötilaksi, samaan tapaan kuin kiihtyvyydestä voidaan integroida hetkellinen nopeus. Lohkokaavioesityksessä nuolen suunta kuvaa prosessin etenemissuuntaa.



Kuva 3.1 Lohkokaavioesitys. Häviöteho lämmittää rautakappaletta.

3.3 Staattisen ja dynaamisen järjestelmän määritelmä

Staattinen järjestelmä on sellainen, jonka nykyhetken lähdöt riippuvat vain ja ainoastaan nykyhetken tuloista. Dynaamisessa järjestelmässä nykyhetken lähdöt vastaavasti riippuvat myös menneiden tulojen arvoista. Yleisesti sanoja staattinen ja dynaaminen käytetään kuvaamaan tilanteita, joissa mikään ei muutu tilanteista, missä tapahtuu muutosta ajan kuluessa. Kuitenkin staattisen järjestelmän lähdöt voivat muuttua ajan kuluessa, mutta vain, jos myös tulot muuttuvat. Dynaamisen järjestelmän lähdöt muuttuvat kuitenkin vielä sen jälkeenkin, kun tulot poistetaan. Staattisen järjestelmän kaikki elementit on oltava staattisia, mutta jos järjestelmässä on yksikin dynaaminen elementti, silloin koko järjestelmä on dynaaminen. (William J. Palm III 1983)

4 DYNAMIIKAN SYNTY LÄMMÖNSIIRTOJÄRJESTELMÄSSÄ

Lämmönsiirtoa laskettaessa tulee ottaa huomioon kappaleen ominaislämpökapasiteetin ja massan aiheuttama hitaus energianvaihtoon. Tehon ja energian välinen yhteys; SI-yksiköiden määritelmän mukaisesti:

$$W = J/s \Leftrightarrow J = W \cdot s. \quad (4.1)$$

Teho on energia per aika ja toisaalta energia on teho kertaa aika.

Kappaleen lämpötila riippuu sen varastoimasta energiasta. Raudan ominaislämpökapasiteetti on $450 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$. Yksi kilogramma rautaa yhden kelvinin lämpötilaerossa sisältää 450 J potentiaalienergiaa vertailukohtaan nähden. Mikäli kilogramman rautakappaletta lämmitetään minuutin ajan 700 W teholla, on kappaleeseen kohdistettu energiamäärä silloin $700 \text{ W} \cdot 60 \text{ s} = 42 \text{ kJ}$. Jos energian ei anneta siirtyä mihinkään, vaan se varastoituu kokonaisuudessaan kappaleeseen, on sen lämpötila lämmityksen jälkeen noussut $(42 \text{ kJ})/(450 \text{ J/K}) = 93,33 \dots \text{ K}$. Kun tiedetään teho, voidaan laskea lämpöenergia tietyn ajan kuluessa. Lämpöenergian perusteella voidaan laskea kappaleen lämpötilan ero alkutilanteeseen nähden.

Massojen, olkoon puhe nyt kiinteiden kappaleiden, nesteiden tai kaasujen massoista, lämpötilaero alkutilanteeseen nähden on kappaleeseen kohdistetun lämpöenergian ja lämpökapasiteetin käänteisluvun tulo:

$$\frac{Q}{c_p m} = \Delta T. \quad (4.2)$$

Lämpötehon ja lämpökapasiteetin käänteisluvun tulo on lämpötilaeron muutosnopeus, toisin sanoen, lämpötilaeron derivaatta:

$$\frac{q}{c_p m} = \frac{d\Delta T}{dt}. \quad (4.3)$$

Jos edellinen yhtälö esitetään SI-perusyksiköillä, voidaan huomata, kuinka lämpötilaeron derivaatta muodostuu.

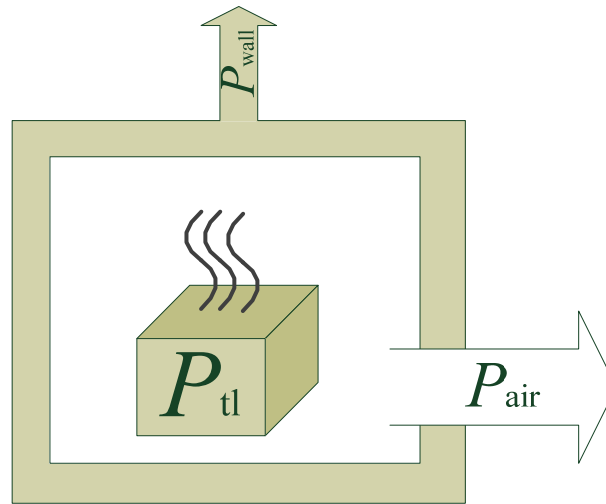
$$[J/s]/([J]/(\text{K} \cdot \text{kg}))\text{kg} = [\text{K/s}] \quad (4.4)$$

Integroimalla lämpötilaeron derivaatta ajan suhteen, saadaan tulokseksi sen hetkinen lämpötilaero alkutilanteeseen nähden:

$$\Delta T = \int_0^t \frac{d\Delta T}{dt} dt . \quad (4.5)$$

5 MALLINNETTAVA JÄRJESTELMÄ

Mallinnettava järjestelmä on avoimen tyyppin kalorimetri, jolla voidaan mitata häviöitä 2 kW:in asti (A. Kosonen *et al.* 2013). Kalorimetrin sisämitat ovat $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Kalorimetrin sisä- ja ulkopinnat on pinnoitettu 3 mm paksuisilla lasikuitulevyillä, joiden välissä on 120 mm paksu polyuretaanieriste. Kalorimetrin lämmönläpäisykertoimeksi on mitattu $0,413\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Seinien sisäpinta-ala on n. 6 m^2 . Kalorimetrin sisällä on lämmitysvastus, jota käytetään kammion esilämmitykseen, tasapainotesteissä ja tämän työn mallin verifiointissa. Lämmitysvastuksen paino on 8,176 kg. Lämmitysvastusta ohjataan säädettävällä DC-teholähteellä. Kammion lähtölämpötilaa säädetään taajuusmuuttajaohjatulla puhaltimella. Lähtölämpötila pyritään pitämään $40\text{ }^\circ\text{C}$:ssa testien aikana. Kuvassa 5.1 on järjestelmän tehotaseen kuvaus.



Kuva 5.1 Mallinnettavan järjestelmän tehotaseen kuvaus.

Kalorimetrin tehotaseen yhtälö on

$$P_{tl} = P_{air} + P_{wall} , \quad (5.1)$$

missä P_{tl} on laitteen tuottama häviöteho, P_{air} ilman kuljettama teho ja P_{wall} seinien läpi johtuva teho. Ilman kuljettama teho määritellään massavirran, ilman ominaisuuksien ja lämpötilaeron avulla:

$$P_{air} = \bar{c}_p \dot{m} \Delta T , \quad (5.2)$$

missä P_{air} on ilman kuljettama teho, \dot{m} ilman massavirta, \bar{c}_p ilman keskimääräinen ominaislämpökapasiteetti ja ΔT lämpötilaero. Seinien läpi johtuva teho on määritelty mitatun lämmönläpäisykertoimen, tunnetun seinien pinta-alan ja lämpötilaeron avulla:

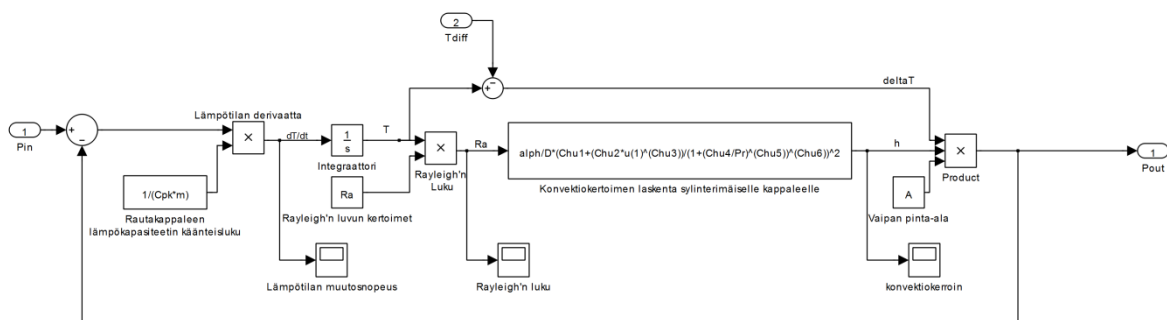
$$P_{\text{wall}} = U_{\text{wall}}A_{\text{wall}}\Delta T , \quad (5.3)$$

missä P_{wall} on seinien läpi johtuva teho, U_{wall} on seinien lämmönläpäisykerroin ja A_{wall} on seinien pinta-ala.

Järjestelmässä on lisäksi lämpöä varaavia elementtejä, kuten lämmittimen rakenteisiin sekä seiniin varastoitua lämpöenergia, jotka on otettava huomioon järjestelmää mallinnettaessa. Lämpöä varaavat elementit luovat järjestelmään lisädynamiikkaa, joka hidastaa lähtöilman lämpiämistä lämmitysvaiheessa sekä hidastaa lähtöilman jäähtymistä, kun lämmitysteho lakkaa.

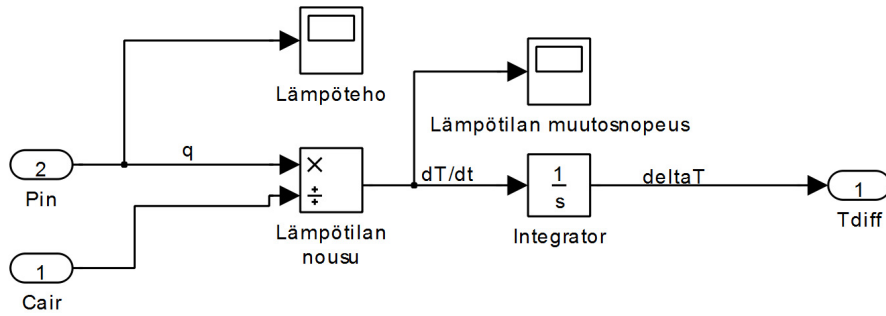
6 DYNAAMISEN LÄMMÖNSIIRTOMALLIN RAKENTAMINEN

Edellä esitetylle kalorimetrille rakennetaan lämmönsiirtomalli Matlab[®] Simulink-ohjelmistolla. Mallinnettavassa järjestelmässä on tulosuureena lämmitysteho, jota kuvataan häviöteholohkolla. Kuvassa 6.1 on esitetty rautakappaleen simulointimalli. Tehon aiheuttama lämpötilan muutosnopeus rautakappaleeseen saadaan laskettua yhtälöstä (4.3). Hetkellinen lämpötila saadaan integroimalla lämpötilanmuutos. Lämpötilan avulla lasketaan Rayleigh'n luku yhtälön (2.6) mukaan, joka kuvaa nostevoiman ja fluidin viskositeetin välistä suhdetta. Rayleigh'n lukua tarvitaan laskemaan konvektion lämmönsiirtokerroin vapaalle konvektiolle yhtälön (2.7) mukaan. Liitteessä II on kalorimetrin simulointimalli kokonaisuudessaan, josta nähdään, että lämmitettävään kappaleeseen on tehty useampi takaisinkytkentä. Takaisinkytkentöjä tarvitaan, jotta saadaan toteutettua perussääntö, jonka mukaan energiansiirto systeemin läpi tulee olla nolla. Rautakappaleen tapauksessa se tarkoittaa sitä, että kappaleen luovuttaman energiamäärän on oltava sama kuin siihen tuleva.



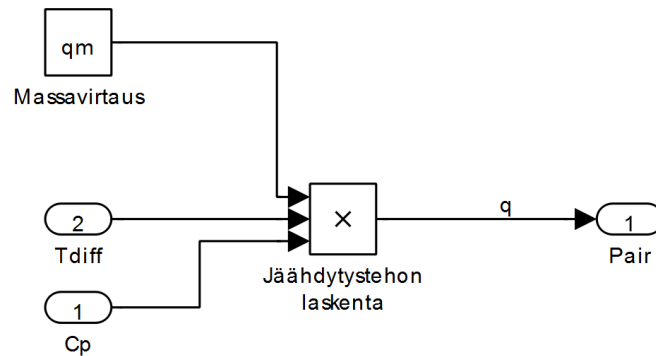
Kuva 6.1 Lämmitettävän kappaleen lämpötilamalli.

Kuvassa 6.2 on esitetty ilman lämpötilamalli. Tulosuureena on rautakappaleesta lähtevä konvektiolämpöteho. Ilman lämpötilamuutos voidaan laskea yhtälön (4.5) avulla. Integroimalla lämpötilanmuutos ajan suhteen saadaan tulokseksi hetkellinen lämpötilan muutos, jota tarvitaan puhaltimen aiheuttaman pakotetun konvektion lämmönsiirtotehon laskentaan ja myös seinien läpijohtuvan lämpötehon laskentaan.



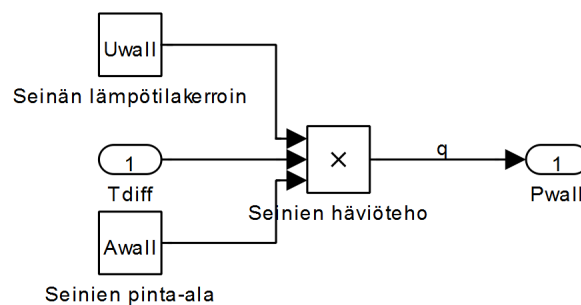
Kuva 6.2 Ilman lämpötilamalli

Kuvassa 6.3 on esitetty pakotetun konvektion lämpötehon lohkokaaavioesitys. Tulosuureena on lämpötilaero ympäristön ja kammion sisäilman välillä. Puhaltimen aiheuttaman pakotetun konvektion lämmönsiirtoteho voidaan laskea yhtälön (4.2) mukaan.



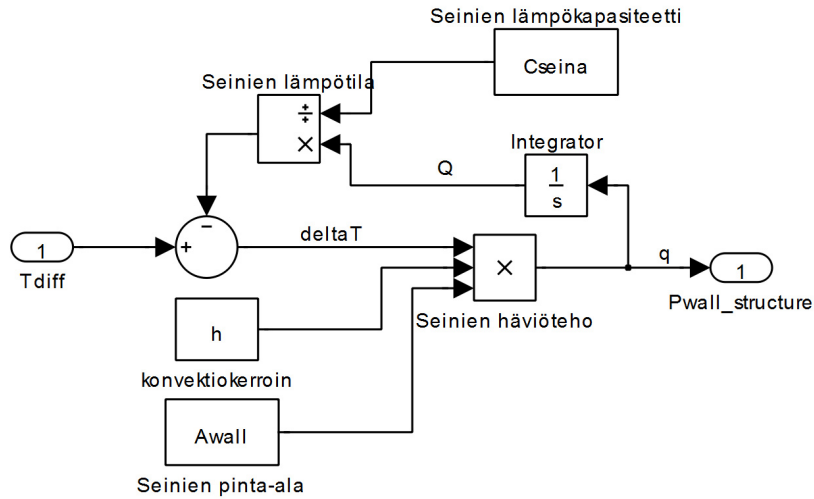
Kuva 6.3 Pakotetun konvektion lämpöteho.

Kuvassa 6.4 on esitetty seinien läpi johtuvan lämpötehon lohkokaaavioesitys. Seinien läpi johtuva häviöteho voidaan laskea yhtälön (4.3) mukaan.



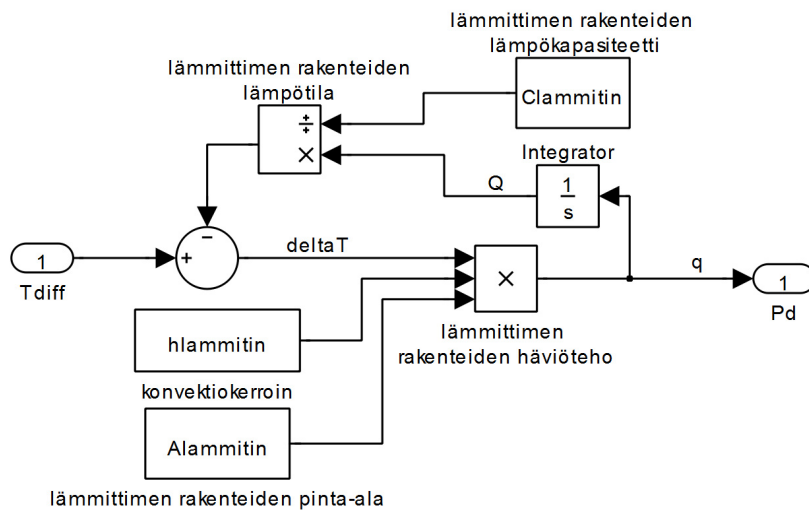
Kuva 6.4 Häviöteho seinien läpi.

Kuvassa 6.5 on esitetty seiiniin varastoituvan lämpöenergian lohkokaaavioesitys.



Kuva 6.5 Seiniin varastoituva lämpöenergia

Kuvassa 6.6 on esitetty lämmittimen rakenteisiin varastoituvan lämpöenergian lohkokaavioesitys.



Kuva 6.6 Lämmittimen rakenteisiin varastoituva lämpöenergia

Seiniin varastoituvan lämpöenergian sekä lämmittimen rakenteisiin varastoituvan lämpöenergian lohkokaavioesitykset toteuttavat yhtälön, joka saadaan muodostettua edellä esitettyjen yhtälöiden (2.10) ja (4.2) avulla,

$$q = hA(\Delta T - \frac{q}{c_p m}). \quad (6.1)$$

6.1 Mallin käyttäminen

Mallin käyttöönottamista varten on tunnettava mallinnettavan järjestelmän parametrit. Työssä käytettävän järjestelmän simuloimista varten on tunnettava lämmitettävän kappa-

leen ominaisuudet, ilman ominaisuudet, seinien ominaisuudet ja ympäristön olosuhteet. Seuraavaksi käydään edellä mainitut kohdat läpi ja kerrotaan, kuinka lukuarvot järjestelmän osille simuloimista varten on saatu.

6.1.1 Lämmitettävä kappale

Lämmitettävän kappaleen tapauksessa on tunnettava kappaleen massa, ulkoiset mittasuhteet sekä käytetyt materiaalit. Kuvassa 6.7 on valokuva laboratoriotesteissä käytetystä lämmitysvastuksesta.



Kuva 6.7 Laboratoriotesteissä käytetty lämmitysvastus.

Edellisestä kuvasta nähdään lämmitysvastuksen massan olevan 8,176 kg. Laskennallisena mallina lämmitysvastuksesta käytettiin vaakaa-asennossa olevan sylinterin mallia. Simulointimallia varten arvioitiin kappaleen lämpiävän osan, sekä kappaleen kylmän osan massat. Lämmityspinta-ala arvioitiin kappaleen massan sekä raudan tiheyden perusteella. Simuloinnissa käytetty arvo kappaleen lämpiävälle massalle on 2,576 kg ja kylmälle massalle 5.6 kg. Lämmitysvastuksen lämpiävän osan materiaali on rautaa, jonka ominaislämpökapasiteetti on $450 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Lämpivän osan pinta-alaksi arvioitiin $0,2639 \text{ m}^2$. Kylmän osan lämmönvarastoinnin simuloimista varten tuli arvioida myös sen lämpökapasiteetti, jonka laskemiseen käytettiin kylmän osan massaa ja raudan ominaislämpökapasiteettia. Täten kylmän osan lämpökapasiteetiksi saatiin $2,52\cdot 10^3 \text{ J/K}$. Kylmän osan konvektiokerrotimeksi arvioitiin $10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

6.1.2 Ilman ominaisuudet

Ilman ominaislämpökapasiteetti riippuu lämpötilasta, ilman kosteudesta sekä ilmanpaineesta. Simuloinnissa käytettiin mitattujen ilman ominaisuuksien keskiarvoa, jonka jälkeen ilman ominaislämpökapasiteetti on laskettu lähteessä (Y.A. Cengel *et al.* 2008) esitettyjen yhtälöiden mukaan. Simulointimallissa on lohko, joka laskee ilman ominaislämpökapasiteetin ilmankosteuden, paineen sekä tulo- ja lähtöilman lämpötilojen perusteella.

6.1.3 Kammion ominaisuudet

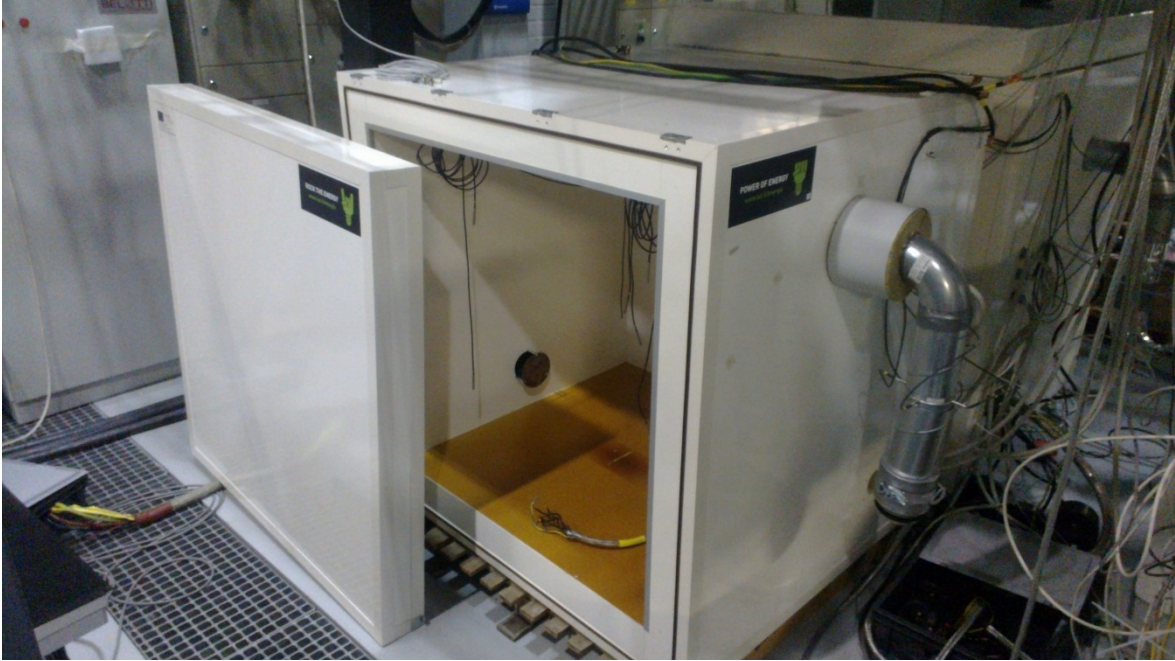
Kammion seinien U-arvoksi on mitattu 0,413 W/(m²·K), jota käytetään kammion seinien läpi johtuvan lämpötehon laskemiseen. Seinien sisäpinta-ala on mitattu 6 m². Todellisuudessa seinien ulkopinta-ala olisi tuota suurempi, mutta sitä ei ole otettu huomioon tässä mallissa. Seinien lämpökapasiteettia yritettiin laskea materiaalien ominaislämpökapasiteettien sekä massojen avulla, mutta simuloidessa tällä tavalla lasketun lämpökapasiteetin arvo oli selvästi liian suuri, eikä vastannut mittaustuloksia, joten seinien lämpökapasiteetti oli arvioitava vastaamaan parhaiten mittaustuloksia. Seinien lämpöä varaavan mallin lämpökapasiteetiksi arvioitiin 5,4·10⁴ J/K, joka on karkea arvio, mutta vastaa parhaiten mittaustuloksia.

Seinien konvektiokerroin muuttuu fluidin virtausdynamiikan mukaisesti puhaltimen massavirran muuttuessa, ilmanpaineen muutosten sekä lämpötilaeron funktiona. Konvektiokerroimen laskemisesta tässä tapauksessa voitaisiin varmasti kirjoittaa oma kandidaatin- tai diplomityö, mutta tämän työn yhteydessä on tyydytty vain arvioimaan konvektiokerroimen suuruus eri tilanteissa.

Puhaltimen ominaisuuksiin ja tulo- tai lähtöilman putkien parametreihin ei tässä mallissa kiinnitetä mitään huomiota. Puhaltimen tuottama massavirtaus lasketaan häviötehon sekä halutun lähtölämpötilan avulla ratkaisemalla \dot{m} yhtälöstä (5.1) sijoittamalla siihen yhtälöt (5.2) ja (5.3), jolloin tulokseksi saadaan

$$\dot{m} = \frac{P_{tl} - U_{wall}A_{wall}\Delta T}{\bar{c}_p\Delta T}. \quad (6.2)$$

Kuvassa 6.8 on valokuva laboratoriotesteissä käytetystä kammioista.



Kuva 6.8 Laboratoriotesteissä ollut kammio.

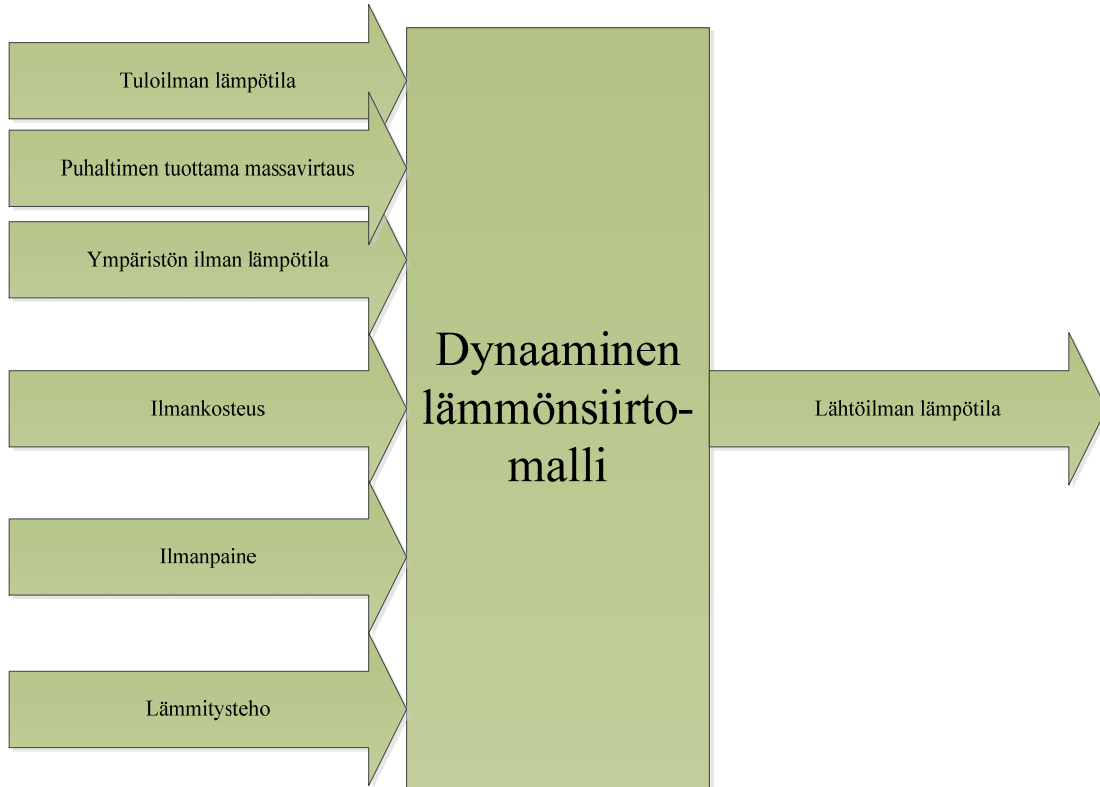
Kammion tuloilma otetaan oikealla seinustalla näkyvän putken kautta. Lähtöilma poistuu kammion vasemman sisäseinän alareunassa näkyvästä aukosta. Ilmapuhallin on sijoitettu lähtöön. Tulo- ja lähtöilmaa mitataan molemmin puolin neljällä lämpötila-anturilla ja ympäristöstä mitataan ilmankosteus, ilmanpaine sekä ilmanlämpötila. Mitattuja arvoja käytetään simuloinnin tuloina.

6.1.4 Ympäristön olosuhteet

Ympäristön ominaisuuksista on tunnettava alkulämpötilat, ilmanpaine ja ilmankosteus. On myös otettava huomioon, että jäähdytysilman lämpötila voi olla eri, kuin lämpötila, johon kammion ulkoseinät altistuvat. Simulointimallia ajaessa käytettiin testisykliä mitattuja arvoja ilmankosteuden, ilmanpaineen, ympäristön ilman lämpötilan ja tuloilman lämpötilan kohdalla. Näin toimien saadaan simulointimallia ajettua samoilla arvoilla, kuin mihin todellinen järjestelmä altistui testien aikana.

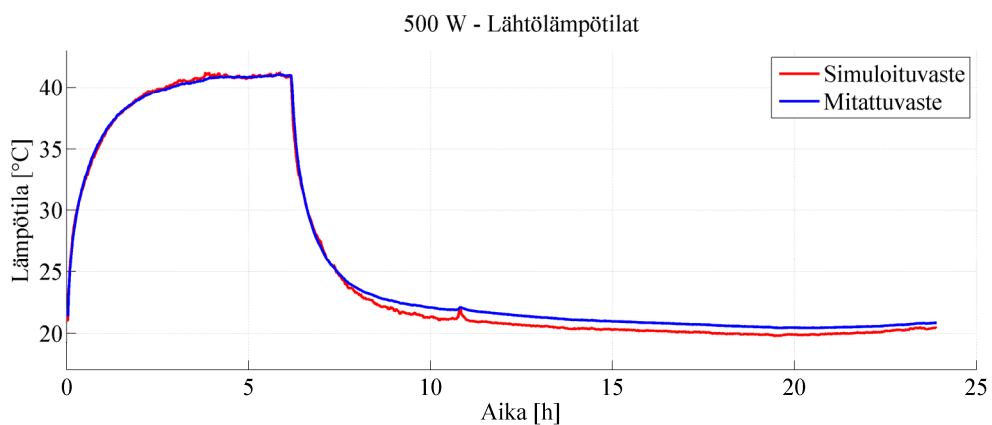
7 SIMULOINTITESTIT JA TULOKSET

Todellisella järjestelmällä ajettiin testit 500 W, 1000 W ja 1500 W teholla. Kuvassa 7.1 on lohkokaavioesitys järjestelmän tuloista ja lähdöistä.

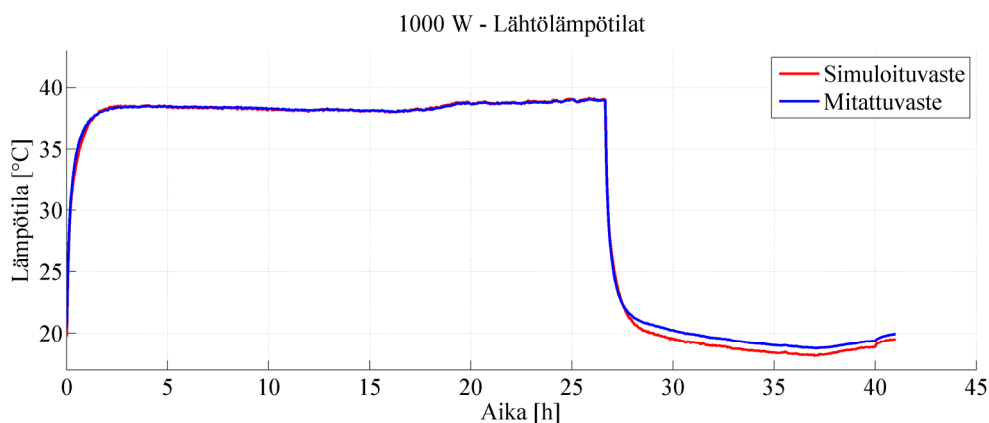


Kuva 7.1 Dynaamisen lämmönsiirtomallin tulot ja lähtö.

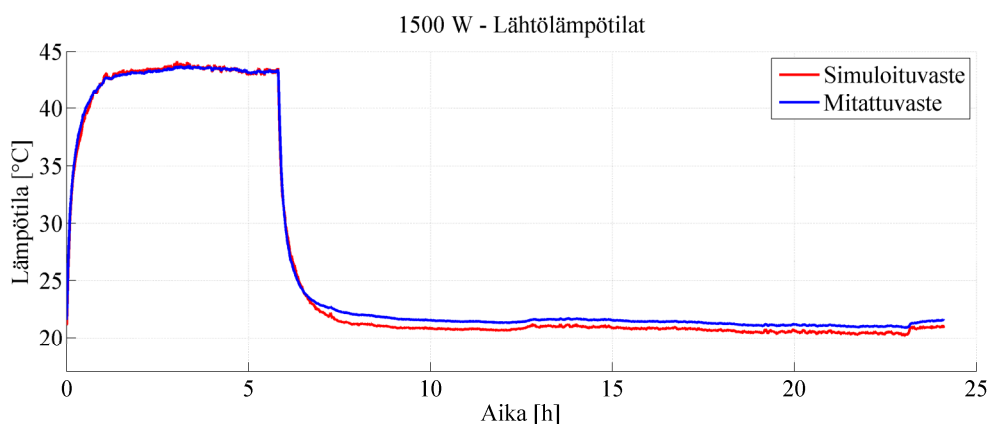
Kuvissa 7.2, 7.3 ja 7.4 nähdään simuloitua sekä todellisen järjestelmän vasteet. Kuvissa sininen käyrä on mitattu lämpötila ja punainen on simuloitua järjestelmän vaste.



Kuva 7.2 Mitattu ja simuloitu lämpötilavaste 500 W teholla.



Kuva 7.3 Mitattu ja simuloitu lämpötilavaste 1000 W teholla.



Kuva 7.4 Mitattu ja simuloitu lämpötilavaste 1500 W teholla.

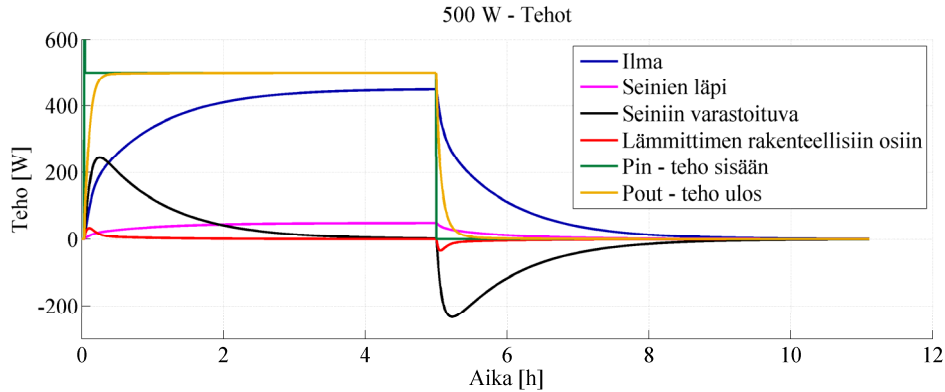
Taulukosta 1 nähdään todellisen ja simuloitun järjestelmän ero ilmaistuna keskimääräisen virheen sekä varianssin avulla aikavälillä 0–19500 s eli 0–5,417 h. Loppulämpötilojen ero johtuu seinien mallin yksinkertaisuudesta. Mittapaikan seinien kerrostuneisuus on jätetty tässä tapauksessa mallintamatta, jonka vuoksi seinien sisärakenteisiin lämmityksessä varastoituneen hitaasti vapautuvan lämpöenergiämäärän vaikutus näkyy selvästi loppulämpötilojen erona.

Taulukko 1. Keskimääräinen virhe ja varianssi aikavälillä 0–19500 s.

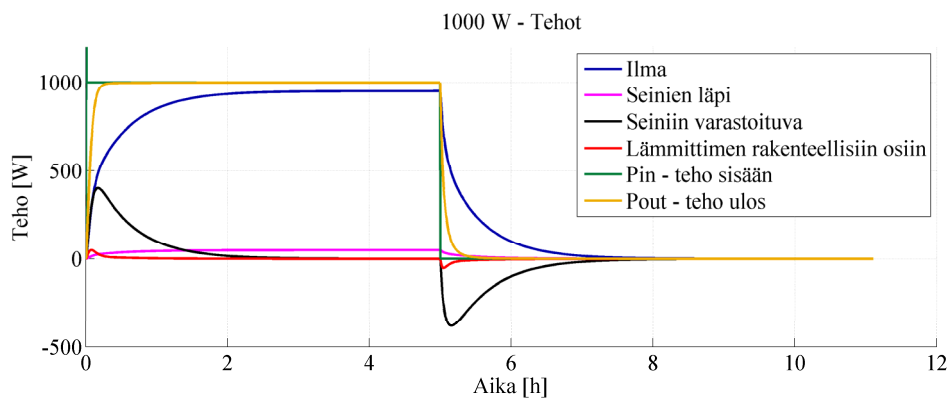
	500 W	1000 W	1500 W
Keskimääräinen virhe [°C]	0,1611	0,1591	0,1871
Varianssi [°C]	0,0334	0,0636	0,3051

Edellisten tuloksien perusteella voidaan todeta mallin vastaavat riittävän tarkasti todellista järjestelmää, jotta sen avulla voidaan tehdä oletuksia järjestelmän käyttäytymisestä ja hyödyntää tuloksia todellisen järjestelmän säätöön ja arviointiin.

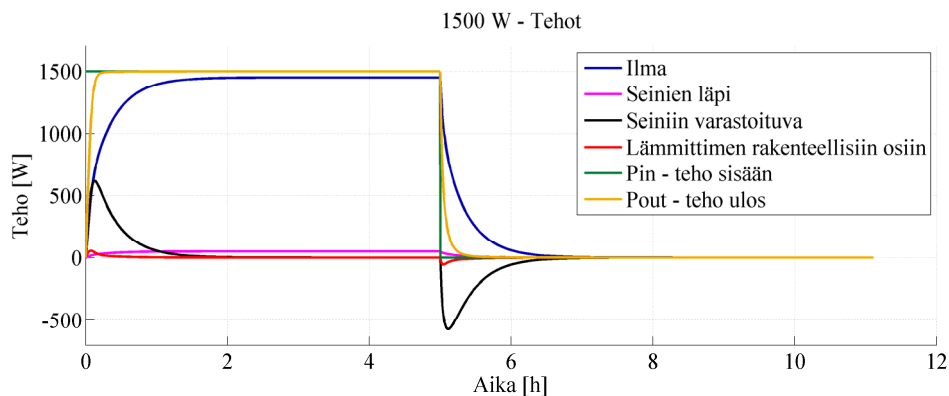
Kuvissa 7.5, 7.6 ja 7.7 on 500 W, 1000 W ja 1500 W tehoilla kuvattuna miten lämpöteho jakautuu simuloidussa järjestelmässä, kun haluttu ulostulolämpötila on 40 °C, sekä sisään tulevan ilman lämpötila, että ympäristön lämpötila on 20 °C, ilmankosteus on 20 % ja ilmanpaine on 1000 hPa. Lämmitysjakson kesto on 5 h.



Kuva 7.5 Tehon jakautuminen 500 W lämmitystekolla. Pin ja Pout ovat liitteessä II näkyvän ”Lämmitettävän kappaleen malli”-lohkon tulo ja lähtö.



Kuva 7.6 Tehon jakautuminen 1000 W lämmitystekolla. Pin ja Pout ovat liitteessä II näkyvän ”Lämmitettävän kappaleen malli”-lohkon tulo ja lähtö.



Kuva 7.7 Tehon jakautuminen 1500 W lämmitystekolla. Pin ja Pout ovat liitteessä II näkyvän ”Lämmitettävän kappaleen malli”-lohkon tulo ja lähtö.

Edellisissä kuvissa sininen käyrä kuvaa ilman mukana kulkevaa tehoa, musta käyrä kuvaa seiniin varastoituvaa tehoa, punainen kuvaa lämmittimen rakenteisiin varastoituvaa tehoa, purppura kuvaa seinien läpi johtuvaa tehoa, vihreä on lämmittimeen tuotava teho ja keltainen on lämmittimestä lähtevä teho.

Kuvista voidaan havaita kuinka seinät ja lämmittimen rakenteet varaavat itseensä lämpöenergiaa, kunnes saavuttavat kammion sisäilman lämpötilan, jonka jälkeen ne lakkaavat varaamasta tehoa itseensä. Jäähdytysvaiheessa lämmittimen rakenteet sekä seinät luovuttavat niihin varastoituneen lämpöenergian yhtälön (6.1) mukaisesti. Jäähtyminen tapahtuu nopeammin tehon kasvaessa suuremmaksi, koska puhaltimen aiheuttama massavirtaus määräytyy halutun ulostulolämpötilan ja lämmitystehon mukaisesti. Kun lämmitysteho kasvaa, niin myös massavirtaus kasvaa, jotta ulostulolämpötila saadaan pidettyä halutussa arvossaan, jonka vuoksi jäähtyminen tapahtuu nopeammin lämmitystehon kasvaessa.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä kehitetään dynaaminen lämmönsiirtomalli, jolla approksimoidaan LUT Energian hyötysuhdemittapaikan keskikokoista kalorimetriä. Simulointimallin avulla voidaan arvioida lämpötehon kulkeutumista järjestelmässä. Osaltaan aikarajoitteiden sekä kandidaatin työn luonteen vuoksi aivan kaikkia kalorimetrisen järjestelmän ominaisuuksia ei voida mallintaa matemaattisesti vaan niiden sijaan käytetään karkeita arvioita. Näistä rajoitteista huolimatta työssä kehitetty dynaaminen lämmönsiirtomalli approksimoi todellisen järjestelmän vastetta lämmitysvaiheessa keskimääräisenvirheen $\pm 0,19$ °C tarkkuudella.

Kehitettyä dynaamista lämmönsiirtomallia voidaan käyttää järjestelmän käyttäytymisen mallintamiseen erilaisissa toimintapisteissä, joissa lämmitysteho, ympäristön lämpötila, ilmanpaine ja -kosteus, sisään tulevan ilman lämpötila sekä puhaltimen tuottama massavirtaus voivat muuttua. Mallin avulla voidaan arvioida kuinka ilman ominaisuuksien muutokset vaikuttavat järjestelmän toimintaan ja sen avulla voidaan virittää järjestelmän säätimiä.

Mallia voidaan kehittää tarkemmaksi korvaamalla karkeat approksimaatiot matemaattisilla malleilla. Tällaisia kehityskohteita ovat:

- Seinien tarkempi malli
- Lämmitettävän kappaleen tarkka rakenteellinen malli
- Kammion sisäilman tarkempi mallinnus käyttäen virtausyhtälöitä

Seinien ja lämmitettävän kappaleen tapauksessa tarkempi malli rakentuisi lämpöresistanssi- ja lämpökapasitanssi-verkoista. Kammion sisäilman käyttäytymistä tulisi arvioida jollain fluididynamiikan yhtälöillä.

Korvaamalla karkeat approksimaatiot matemaattisilla malleilla saadaan tämän työn dynaamisesta lämmönsiirtomallista kehitettyä paremmin skaalautuva approksimaatio erikoisille kalorimetrisille häviömittausjärjestelmille, joita LUT Energian hyötysuhdemittapaikalla on.

LÄHTEET

A. Kosonen, L. Aarniovuori, J. Pyrhönen, M. Niemelä, and J. Backman (2012). Calorimetric concept for measurement of power losses up to 2 kW in electric drives. To be published *IET Electr. Power Appl.*, 2013

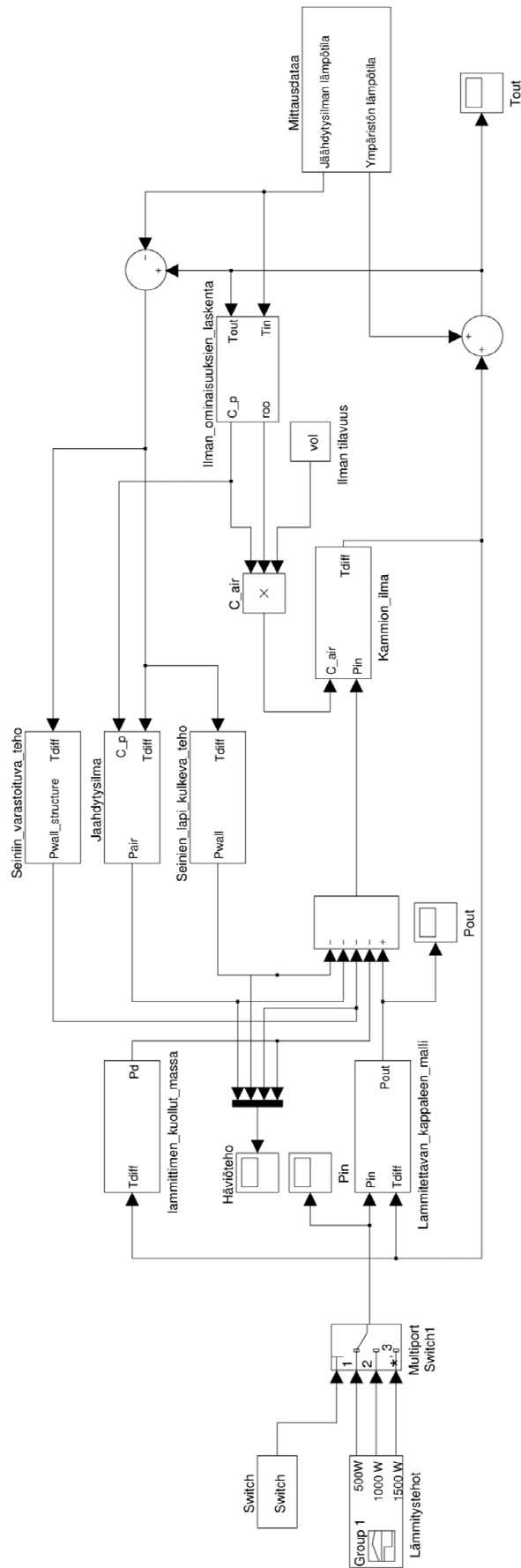
Frank P. Incropera, David P. De Witt (1985). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York.

J. P. Holman (1989). Heat transfer. S I metric edition. McGraw-Hill book company, Singapore.

William J. Palm III (1983). Modeling, analysis, and control of dynamic systems. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Yunus A. Cengel, Robert H. Turner, John M. Cimbala (2008). Fundamentals of thermal-fluid sciences. Third edition. McGraw-Hill Science Engineering, Singapore.

Mitattava suure	Suureen tunnus	Yksikön nimi	Yksikön tunnus	Yksikkö muilla yksiköillä ilmaistuna
lämpötila	T	celsiusaste	°C	K (lämpötilaero)
energia	E	joule	J	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ (= $\text{N}\cdot\text{m} = \text{W}\cdot\text{s}$)
teho	P	watti	W	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$ (= $\text{V}\cdot\text{A} = \text{J}/\text{s}$)
lämpökapasiteetti	C		J/K	$\text{kg}\cdot\text{m}^2/(\text{s}^2 \text{K})$
ominaislämpökapasiteetti	c		J/(K·kg)	$\text{m}^2/(\text{s}^2 \text{K})$
lämmönjohtavuus	λ		W/(K·m)	$\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{s}^3\cdot\text{K})$
lämmönsiirtymiskerroin	h, α		W/(K·m ²)	$\text{kg}/(\text{s}^3\cdot\text{K})$
lämmönläpäisykerroin	k			
termodynaaminen lämpötila	T	kelvin	K	Kelvin on 1/273,16 veden kolmoispisteen termodynaamisesta lämpötilasta (13. CGPM, 1967).



Muuttujan nimi	Muuttujan arvo
m	2.576
mlammitin	8.176-m
hlammitin	10
Alammitin	2
Clammitin	450*mlammitin
Uwall	0.413
Awall	6
Cseina	2*27000
r	0.04
l	2.1
A	2*pi*r*l
Cpk	450
vol	1
D	2*r
g	9.81
b	3.2*10 ⁻³
v	16.97*10 ⁻⁶
a	22.9*10 ⁻⁶
Ra	$(g*b*D^3)/(v*a)$
alph	0.0271
Pr	0.7119
Chu1	0.6
Chu2	0.387
Chu3	1/6
Chu4	0.559
Chu5	9/16
Chu6	8/27

	h	TdOut	Tin	Ptl
500 W	7.5	41.01	21.42	500
1000 W	9.5	38.83	20.4	1000
1500 W	11	43.23	21.33	1500

```
%%Hyötysuhdemittapaikka
%Dynaamisen lämpötilamallin suunnittelu
close all
clear all

load mitattu2.mat;
load mitattu3.mat;
load mitattu4.mat;

m=2.576;
mlammitin=8.176-m;

hlammitin=10;
Alammitin=2;
Clammitin=450*mlammitin;

Uwall=0.413;          %Seinän U-arvo
Awall=6;              %Seinien pinta-ala
% Seinien lämpökapasiteetti
Cseina=2*27000;

%Sylinterimäisen laitteen mittasuhteet: r=säde, p=pituus, metriä.
r=0.04;
l=2.1;

%vaipan pinta-ala A
A=2*pi*r*l;

%Lämmitettävän kappaleen ominaislämpökapasiteetti [J/(Kg*K)]
Cpk=450;              %Raudalle 450
%Lämmitettävän kappaleen massa [Kg]

%Jäähdytysilman ominaisuudet
vol=1;                %Ilman tilavuus

%Rayleigh'n luvun laskenta
D=2*r;                %Kappaleen halkaisija
g=9.81;               %Putoamiskiihtyvyys
b=3.2*10^-3;          %Fluidin lämpötilasta riippuva laajentumiskerroin
v=16.97*10^-6;        %Kinemaattinen viskositeetti
a=22.9*10^-6;

Ra=(g*b*D^3)/(v*a);  %Rayleigh'n luvun kertoimet

%Konvektiokertoimen laskenta
alph=0.0271;          %Lämmönjohtavuus
Pr= 0.7119;           %Prandtl'n luku

%Konvektiokerroin Churchill&Chu sovituksella sylinterimäiselle kappaleelle
%Muoto  $\alpha/D * (Chu1 * (Chu2 * u(1) ^ (Chu3)) / (1 + (Chu4/Pr) ^ (Chu5)) ^ (Chu6)) ^ 2$ 
Chu1=0.6;
Chu2=0.387;
Chu3=1/6;
Chu4=0.559;
Chu5=9/16;
Chu6=8/27;
```

```

% Simulointi parametrit 500 W
Switch=1;
p=998.62;           %Jäähdytysilman paine
hum=19.87;         %Jäähdytysilman kosteus
Tinf=21.63;        %Ympäristön lämpötila
Tin=21.42;         %Jäähdytysilman lämpötila
TdOut=41.01;       %Haluttu lähtölämpötila

h=7.5              %Konvektiokerroin ilmasta seiniin siirtyvälle teholle
Ptl=500;           %Häviöteho

scrsz = get(0, 'ScreenSize');

%Jäähdytysilman teho
[roo cp R x pspv cpa cpv]=AirProperties(Tin,hum,p,TdOut);
Pi=Ptl-Uwall*Awall*(TdOut-Tin);
%Tarvittava massavirta pitämään Tout halutussa lämpötilassa
q_m=Pi/(cp*(TdOut-Tin))           %Massavirta

set_param('Lampotilamalli','StopTime','86070');
%open_system('Lampotilamalli.mdl');
sim('Lampotilamalli.mdl');
%open_system('Lampotilamalli/Tout');
Tout500=Tout;
Haviodata500=Haviodata;
Pin500=Pin;
Pout500=Pout;
keskivirhe500=mean(abs(mitattu2(1:1300)-Tout500(1:1300,2)))
varianssi500=var(mitattu2(1:1300)-Tout500(1:1300,2))
% Simulointi parametrit 1000 W
Switch=2;
p=994.19;           %Jäähdytysilman paine
hum=31.18;         %Jäähdytysilman kosteus
Tinf=20.408;       %Ympäristön lämpötila
Tin=20.4;          %Jäähdytysilman lämpötila
TdOut=38.83;       %Haluttu lähtölämpötila
h=9.5              %Konvektiokerroin ilmasta seiniin siirtyvälle teholle
Ptl=1000;          %Häviöteho

%Jäähdytysilman teho
[roo cp R x pspv cpa cpv]=AirProperties(Tin,hum,p,TdOut);
Pi=Ptl-Uwall*Awall*(TdOut-Tin);
%Tarvittava massavirta pitämään Tout halutussa lämpötilassa
q_m=Pi/(cp*(TdOut-Tin))           %Massavirta

set_param('Lampotilamalli','StopTime','147600');
%open_system('Lampotilamalli.mdl');
sim('Lampotilamalli.mdl');
%open_system('Lampotilamalli/Tout');
Tout1000=Tout;
Haviodata1000=Haviodata;
Pin1000=Pin;
Pout1000=Pout;
keskivirhe1000=mean(abs(mitattu3(1:1300)-Tout1000(1:1300,2)))
varianssi1000=var(mitattu3(1:1300)-Tout1000(1:1300,2))
% Simulointi parametrit 1500 W
Switch=3;
p=994.36;           %Jäähdytysilman paine
hum=27.94;         %Jäähdytysilman kosteus
Tinf=21.6;         %Ympäristön lämpötila

```

```
Tin=21.33;           %Jäähdytysilman lämpötila
TdOut=43.23;        %Haluttu lähtölämpötila
Ptl=1500;           %Häviöteho
h=11                %Konvektiokerroin ilmasta seiniin siirtyvälle teholle
%Jäähdytysilman teho
[roo cp R x pspv cpa cpv]=AirProperties(Tin,hum,p,TdOut);
Pi=Ptl-Uwall*Awall*(TdOut-Tin);
%Tarvittava massavirta pitämään Tout halutussa lämpötilassa
q_m=Pi/(cp*(TdOut-Tin))           %Massavirta

set_param('Lampotilamalli','StopTime','86775');
%open_system('Lampotilamalli.mdl');
sim('Lampotilamalli.mdl');
%open_system('Lampotilamalli/Tout');
Tout1500=Tout;
Haviodata1500=Haviodata;
Pin1500=Pin;
Pout1500=Pout;
keskivirhe1500=mean(abs(mitattu4(1:1300)-Tout1500(1:1300,2)))
varianssi1500=var(mitattu3(1:1300)-Tout1500(1:1300,2))
%%
drawFigures;
```