

Alexi Littow

**Tiilimuuratun savuhormin palotekninen yläpohja- ja vesikattoliit-
tymätarkastelu simuloimalla**

Tiilimuuratun savuhormin palotekninen yläpohja- ja vesikattoliit- tymätarkastelu simuloimalla

Alexi Littow
Opinnäytetyö
Syksy 2020
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma, talonrakennustekniikka

Tekijä: Aleksi Littow

Opinnäytetyön nimi: Tiilimuuratun savuhormin palotekninen yläpohja- ja vesikat-
toliittymätarkastelu simuloimalla

Työn ohjaaja: Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2020

Sivumäärä: 40

Nykyisillä elementtimenetelmään perustuvilla simulointiohjelmilla on mahdollista vertailla erilaisia rakenteita erittäin monipuolisesti. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin lämpötiloja tiilimuuratun savuhormin ympärillä simuloimalla erilaisia yläpohja- ja vesikattorakenteita. Pääasiassa eri rakenteissa muuttuivat vain eristemateriaali ja eristepaksuus. Ennen kuin erilaisten rakenteiden simuloointeihin päästiin, täytyi varmistua simulointimallin oikeellisuudesta vertailemalla saatuja tuloksia polttotestistä saatuun sensoridataan.

Työssä simuloinnit suoritettiin Comsol Multiphysics 5.5 -ohjelmalla. Olosuhteet noudattelivat standardoituja testiolosuhteita. Simuloinneissa tarkasteltiin lämpötiloja savuhormin ympärillä liittymärakenteissa sekä yläpohjassa että vesikatossa.

Polttotestiin verrattaessa huomattiin, että luodulla simulointimallilla päästiin erittäin lähelle polttotestissä vallitsevia maksimilämpötiloja. Osassa mittauspisteissä rakenteen reunamilla erot kasvoivat melko suuriksi johtuen simulointimallin yksinkertaistamisesta. Tärkeintä oli kuitenkin saada rakenteen keskellä vallitsevat maksimilämpötilat mahdollisimman lähelle polttotestin lämpötiloja.

Saatujen tulosten perusteella yläpohjassa olisi mahdollista käyttää pienempää eristepaksuutta kuin asetuksessa on tällä hetkellä määrätty. Vesikatossa täytyy kiinnittää huomiota aluskatteen lämpötilan kestävyys ja eristemateriaaliin. Työssä havaittiin myös, että savuhormin pituudella on vaikutusta lämpötiloihin.

Simulointeja toteutettiin myös tilanteessa, jossa ympäristön olosuhteita muutettiin rajummiksi vertailun vuoksi. Olosuhteet ovat kuitenkin teoreettisia ja niiden muutoksella oli käytännössä vaikutusta vain vesikattoon, jossa lämpötilat nousivat merkittävästi.

Asiasanat: Comsol, yläpohja, vesikatto, lämpö, savuhormi

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building Engineering

Author: Aleksi Littow

Title of thesis: Study of Thermal Performance of Chimney Joint Structures

Supervisor: Kimmo Illikainen

Term and year when the thesis was submitted: Fall 2020

Pages: 40

Nowadays simulation programs are very versatile, and one can simulate models in many ways. In this thesis, the objective was to study temperatures around chimney joint structures by simulating them. The main thing that changed in different joint structures were the thickness and material of the insulation used. Before moving on to simulating different joint structures the model had to be checked to find out if it provided correct results by comparing the results to sensor data from a chimney burning test.

In this thesis the simulations were done using Comsol Multiphysics 5.5. The conditions used are standardized. Maximum temperatures were observed in upper and lower roof joint structures around the chimney.

When comparing simulation results to the sensor data, the results were surprisingly close to the sensor data in the middle of the insulation. In the edges the temperature differences were fairly large, which was caused by simplification of the model. The most important thing was to get the maximum temperatures in the middle of the insulation close to the sensor data, where the temperatures are the highest.

Assessing the results, it was noticed that the lower roof joint structure could be made using less thick insulation than the regulation instructs. In the upper roof joint, one must take into account the insulation material and the temperature tolerance of the underlay. The height of the chimney also affects the temperatures in the joints.

Simulations were also done in a situation where the conditions were made harsher by increasing surface temperatures. The conditions used were theoretical. The changes of the conditions had significant impact on the temperatures at the upper roof joint. On the lower roof joint the increase in surface temperatures had little effect.

Keywords: Comsol, temperature, upper roof joint, lower roof joint, chimney

ALKULAUSE

Kiitän ensimmäisenä Kimmo Illikaista opinnäytetyön ohjauksesta. Kiitän Suomen tiiliteollisuusliittoa mahdollisuudesta tähän työhön. Kiitän Markku Hienosta uskottomasta työpanoksesta opinnäytetyön ohjauksessa. Kiitän myös Filip Fedorikia, jonka antama ohjaus simulointiin liittyen auttoi erittäin merkittävästi.

Otin haasteen vastaan ennakkoluulottomasti ja se osoittautuikin haastavaksi, niin kuin oli luvattu. Savuhormeista on tehty erittäin niukasti simuloiteja, eikä käyttämälläni ohjelmalla ollut yhtään vastaavia simuloiteja, ainakaan julkisesti. Kuitenkin kantapään kautta sain muodostettua toimivan simulointimallin, jolla sain tuotettua hyödyllisiä tuloksiakin.

Kiitän vielä lopuksi kaikkia niitäkin mukana olleita, joiden nimet eivät jääneet mieleen. Kaikki palaute oli kuitenkin kullanarvoista simulointimallin kehityksen kannalta.

Oulussa 7.12.2020

Alexi Littow

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	7
2 PALOMÄÄRÄYS	8
3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN	10
3.1 Johtuminen	10
3.2 Säteily	11
3.3 Konvektio	11
4 SAVUHORMIN SIMULOINTI	13
4.1 COMSOL Multiphysics	13
4.2 Mallintaminen	13
4.2.1 Geometrian luominen	14
4.2.2 Materiaaliominaisuuksien asetus	16
4.2.3 Käytetyt fysiikat	18
4.2.4 Reunaehtojen asetus	19
4.2.5 Laskentaverkon määrittäminen	23
5 SIMULOINTITULOSTEN ANALYSOINTI	25
5.1 Polttotestimalli	25
5.2 Yläpohjaliittymärakenteet 1, 2 ja 3	26
5.3 Vesikattoliittymärakenteet 1 – 7	30
5.4 Yläpohja vaihtoehtoisessa tilanteessa	32
5.5 Savuhormin pituuden vaikutus lämpötiloihin	34
6 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	40
LIITTEET (malli, jos liitteitä viisi tai vähemmän; huom. pakotetut rivinvaihdot)	

1 JOHDANTO

Tällä hetkellä kilpailu tiilimuurattujen- ja teräshormien välillä on kiivasta. Suurin osa rakennetuista savuhormeista rakennetaan nimenomaan teräksestä, koska se on kustannustehokkaampi ja nopeampi ratkaisu. Simuloimalla hormirakenteiden suunnittelu- ja rakennuskustannuksia saataisiin mahdollisesti pienennettyä ja rakenteista saataisiin samalla turvallisempia, koska rakenteita voitaisiin tutkia monipuolisemmin.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan tiilimuuratun savuhormin yläpohja- ja vesikattoliitosten lämpötilajakautia simuloimalla erilaisia rakenneratkaisuja. Yläpohja- ja vesikattoliitosrakenteita on useampi, ja niistä saatuja tuloksia vertaillaan toisiinsa.

Simuloinnit tehdään käyttämällä COMSOL Multiphysics 5.5 -ohjelmaa. Simulointien tavoitteena oli selvittää, ylittävätkö lämpötilat raja-arvon savuhormin ympärillä olevissa rakenteissa annetuilla rakenneratkaisuilla. Samalla testataan erilaisia rakenteita ja eristemateriaaleja, jotka ovat toimivia ja hyviä ainakin paloteknisesti.

Simuloinnissa käytetään standardin EN 13216-1:2004 T600 palonkestävyyskokeen mukaisia testiparametrejä. Realistisesti normaalikäytössä palokaasujen lämpötilat eivät pääse nousemaan testilämpötilojen tasolle ainakaan pitkäksi ajaksi, joten testi kuvastaa lähinnä erittäin harvinaista tilannetta.

Ongelmana on saada simulointitulokset mukailemaan palotestin tuloksia luotettavasti. Muuratuista savuhormeista on tehty niukasti muita simulointeja, joten sekin tuottaa hiukan haasteita toimivan simulointimallin teossa. Geometria on mahdollista saada hyvinkin tarkasti vastaamaan oikeaa rakennetta, mutta suurimmat ongelmat tulevat vastaan materiaaliominaisuuksien ja reunaehtojen määrittämisessä.

Simuloinnilla voidaan helposti tarkastella erilaisia rakenteita käyttötilanteessa. Jos parametrit simulointiin saadaan asetettua oikein, simulointitulokset voivat olla erittäinkin tarkkoja. Simulointi on aina nopeampi ja halvempi keino testata rakenteita ja materiaaleja verrattuna oikean polttotestin tekemiseen.

2 PALOMÄÄRÄYS

Savupiippujen rakentamista säätelee ympäristöministeriön asetus savupiippujen rakenteista ja paloturvallisuudesta. Asetus koskee savuhormeja, joihin liitettyjen tulisijojen lämpöteho on enintään 120 kilowattia. Asetus on julkaistu vuonna 2017. (3, § 1.)

Asetus toimii perustana piipun suunnittelussa ja rakentamisessa. Asetuksessa käydään läpi vaadittavia ominaisuuksia savuhormeille. Asetus antaa myös mahdollisuuden perustella erilaisten rakenteiden kelpoisuutta koetuloksilla tai laskentamenetelmällä, jonka oikeellisuus on tarkistettu kokeiden perusteella. (3, § 6.)

Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on maininta, että savuhormin vierellä, muussa kuin A1-luokan rakennustarvikkeessa ei saa lämpötila nousta yli 85 °C:seen. Ohjeissa on myös maininta, että hormin vierelle läpimenokohtiin tulee laittaa lämpöä eristävä kerros, joka kuuluu A1-luokan rakennustarvikkeisiin. (8, s. 11.)

Suomen Rakennusinsinöörien Liiton tuore julkaisu RIL 245-2020 esittelee savupiippujen suunnitteluun, rakentamiseen ja turvallisuuteen liittyviä asioita. Julkaisu on tehty Ympäristöministeriön asetuksen tueksi. Julkaisussa esitetään erittäin selkeästi vaaditut suojaetäisyydet tiilihormin ympärillä. Ohjeessa on myös mukana esimerkiksi esimerkkirakenteita. Suojaetäisyyksiä esitetään kuvassa 1. (6, s. 105.)

Taulukko 7.3. Tiilipiipun suojaetäisyydet.

Yläpohjan eristepaksuus ≤ 300 mm	100 mm
Yläpohjan eristepaksuus 300–600 mm	120 mm
Yläpohja: Koolaukset	50 mm
Yläpohja: Pintamateriaali, höyrynsulkumuovi ja palava-aineinen listoitus	20 mm
Vesikatto: Kaikki palava-aineinen, aluskatteen tiivistys höyrynsulkuteipillä	20 mm
Vesikatto: 20 mm rappaus tai kalsiumsilikaattilevy, vaihtoehtoisesti sementtikuitulevy + 10 mm palosuojaeriste piipun pinnassa - Aluskate ja kattokuva nostetaan piipun pintaan + höyrynsulkuteippi	0 mm
Välipohja: Palosuojaeristeen korkeus ≤ 400 mm	100 mm
Teräsrakenteet	20 mm
Vaatehuone/varasto: Suojaus irroitettavalla reikälevyllä tai säleiköt alas ja ylös á 200 cm ² tarkistusta ja puhdistusta varten	50 mm
Vaatehuone/varasto: 230 mm etäisyys savukanavasta A1-materiaaleilla	230 mm
Väliseinä: Tiilipiipun etäisyys palava-aineisesta seinästä, kun välissä on tuulettuva ilmaväli	50 mm
Väliseinä: Savukanavan etäisyys palava-aineisesta seinästä, kun välissä on A1-materiaali	230 mm

KUVA 1. Savuhormin suojaetäisyyksiä (6, s. 105)

3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN

Lämpö on värähtelyliikettä, joka tapahtuu atomien ja molekyylien välillä. Lämpö siirtyy kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla. (1, s. 40.)

3.1 Johtuminen

Johtumisella tarkoitetaan lämmön virtaamista molekyylistä toiseen, siis molekyylien värähtelyliike siirtyy toisiin molekyyliihin. Usein lämmönjohtumisen sijaan puhutaan lämpövirtauksesta. Lämpö pyrkii virtaamaan kuumasta kylmään, pyrkien tasoittamaan lämpötilaeroja nesteessä tai kiinteässä aineessa. (1, s. 40.) Lämpövirran määrää voidaan laskea kaavalla 1 (2, s. 12).

$$Q = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{d} \quad \text{KAAVA 1}$$

Q = lämpövirta [W/m^2]

λ = Materiaalin tai seinämän lämmönjohtavuus [W/mK]

$(T_1 - T_2)$ = Seinämän tai materiaalin ulko- ja sisäpintojen välillä vallitseva lämpötilaero [$^{\circ}\text{C}$ tai K]

d = Materiaalin tai seinämän paksuus [m]

Lämmönjohtavuus suureena ilmoittaa lämpövirran suuruuden yksikön paksuisen homogeenisen ainekerroksen läpi, kun sisä- ja ulkopinnan lämpötilaero on yksikön suuruinen. Lämmönjohtavuutta merkitään symbolilla λ ja sen yksikkö on $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$. (1, s. 41 - 42.)

Lämmönjohtavuuden arvo ei suinkaan ole vakio, vaan sen suuruus muuttuu esimerkiksi lämpötilan ja kosteuden muuttuessa. Mitä suurempi lämmönjohtavuuden arvo materiaalilla on, sitä enemmän lämpöä kulkeutuu materiaalin läpi. (1, s. 41 - 42.)

Lämmön siirtymiseen liittyy oleellisesti aineen lämmönvastus R . Ainekerroksen lämmönvastus saadaan laskettua kaavalla 2. Lyhyesti lämmönvastus on ainekerroksen paksuuden suhde sen lämmönjohtavuuteen. Jos kyseessä on esimerkiksi seinä, jossa on useampi ainekerros, eri ainekerroksien lämmönvastukset laskeetaan yhteen, jotta saadaan kokonaislämmönvastus. Kokonaislämmönvastukseen lisätään vielä ulko- ja sisäpinnan pintavastusten (R_{si} ja R_{se}) arvot. (2, s. 12–14.)

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

KAAVA 2

R = Lämmönvastus [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

λ = Materiaalin lämmönjohtavuus [W/mK]

d = ainekerroksen paksuus [m]

3.2 Säteily

Säteilyllä tarkoitetaan energian siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Säteilyä tapahtuu kaikella materiaalilla, jonka lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Mitä matalampi lämpötila on, sitä vähemmän säteilyä tapahtuu ja päinvastoin. (2, s. 12.)

Rakennustekniikassa säteilytyyppejä on kaksi, lyhytaaltainen auringonsäteily ja pitkäaaltainen kappaleista säteilevä lämpö. Säteilyyn liittyy pintojen emissiivisyys, joka kertoo materiaalipinnan säteily määrän suhteen täysin mustan kappaleen säteily määrään. (1, s. 40–41.)

3.3 Konvektio

Konvektiossa lämpöä siirtyy väliaineen, joko nesteen tai kaasunvirtauksen mukana. Konvektiota tapahtuu kahdella eri tavalla, pakotetusti ja luonnollisesti. (2, s. 13.)

Pakotettu konvektio on helpoimmin havaittava ilmiö. Siinä jokin ulkoinen voima aiheuttaa virtauksen kaasussa tai nesteessä. Koneellinen ilmanvaihto ja tuuli

ovat erittäin hyviä esimerkkejä pakotetusta konvektiosta. Myös ihmisten liikkeen aiheuttama virtaus kaasussa tai nesteessä on pakotettua konvektiota. (2, s. 13.)

Luonnollinen konvektio tapahtuu lämpötilaerojen aiheuttamien tiheyserojen takia. Luonnollista konvektiota tapahtuu merkittävästi esimerkiksi paksuissa eristekerroksissa. Puhtaan luonnollisen konvektion tapahtuminen on kuitenkin harvinaista ja yleisimmin kyse onkin luonnollisen ja pakotetun konvektion yhdistelmästä. (2, s. 13.)

4 SAVUHORMIN SIMULOINTI

Opinnäytetyössä tehtyjen simulointien tavoitteena oli tutkia lämpötiloja liittymärakenteissa yläpohjassa ja vesikatossa. Ensimmäisenä luotiin simulointimalli. Simulointimallin asetusten määrittämisessä täytyy olla huolellinen, jotta tuloksista saadaan järkeviä. Seuraavissa luvuissa käydään läpi, simulointimallin muodostamisen vaiheet.

4.1 COMSOL Multiphysics

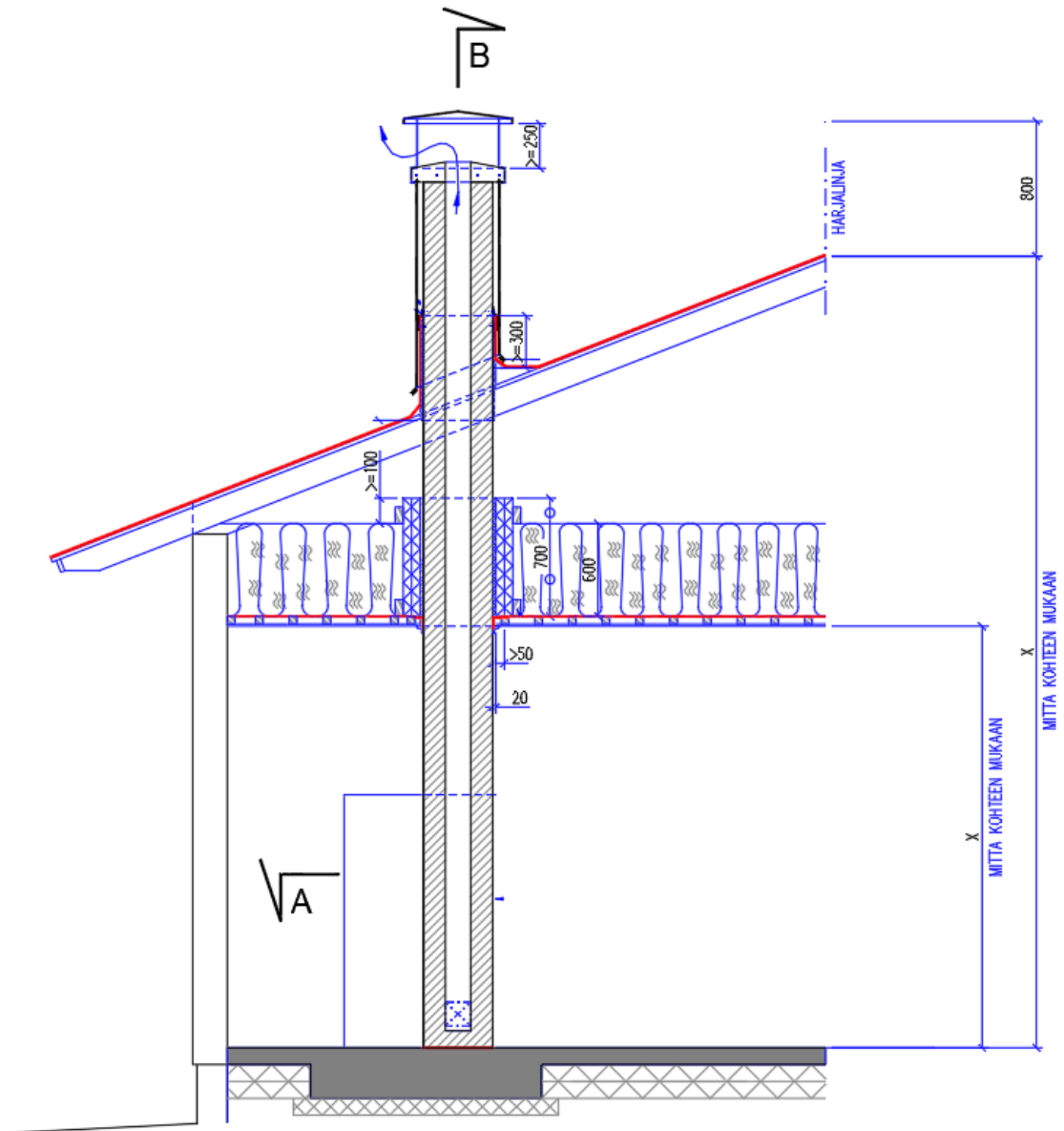
COMSOL Multiphysics 5.5 on simulointiohjelmisto, jolla on laajat käyttömahdollisuudet. Ohjelmaa voidaan hyödyntää monella eri tavalla esimerkiksi lämpö- ja nestevirtauksien tutkimisessa tai vaikkapa kuormitetun rakenteen sisäisten jännitysten tutkimisessa. (9, linkit Products -> Comsol Multiphysics.)

COMSOL Multiphysics 5.5 -ohjelmalla voidaan tehdä malleja, joissa on käytössä monifysiikkamalli. Monifysiikkamallilla voidaan esimerkiksi tehdä simulaatioita, joissa ohjelma yhdistää nestevirtauksen ja lämmön siirtymisen. (9, linkit Products -> Comsol Multiphysics.)

4.2 Mallintaminen

Ensimmäisenä mallina tässä työssä käytettiin Eurofins Expert Servicen tekemän polttotestin mukaista savuhormia. Raportissa oli mukana myös sensoridataa, jota pystyttiin käyttämään hyväksi mallin oikeellisuuden tarkistamisessa. Kun simulointitulokset saatiin lähelle polttotestin tuloksia, saatiin varmuus siitä, että malli oli toimiva ja sitä pystyisi soveltaa erilaisiin rakenteisiin.

Lähtökohtana yläpohja- ja vesikattorakenteiden geometrian luonnissa käytettiin saatuja rakennekuvia. Esimerkki mallina käytetystä rakenteesta näkyy kuvassa 2. Malleja on yksinkertaistettu tarpeen vaatiessa.



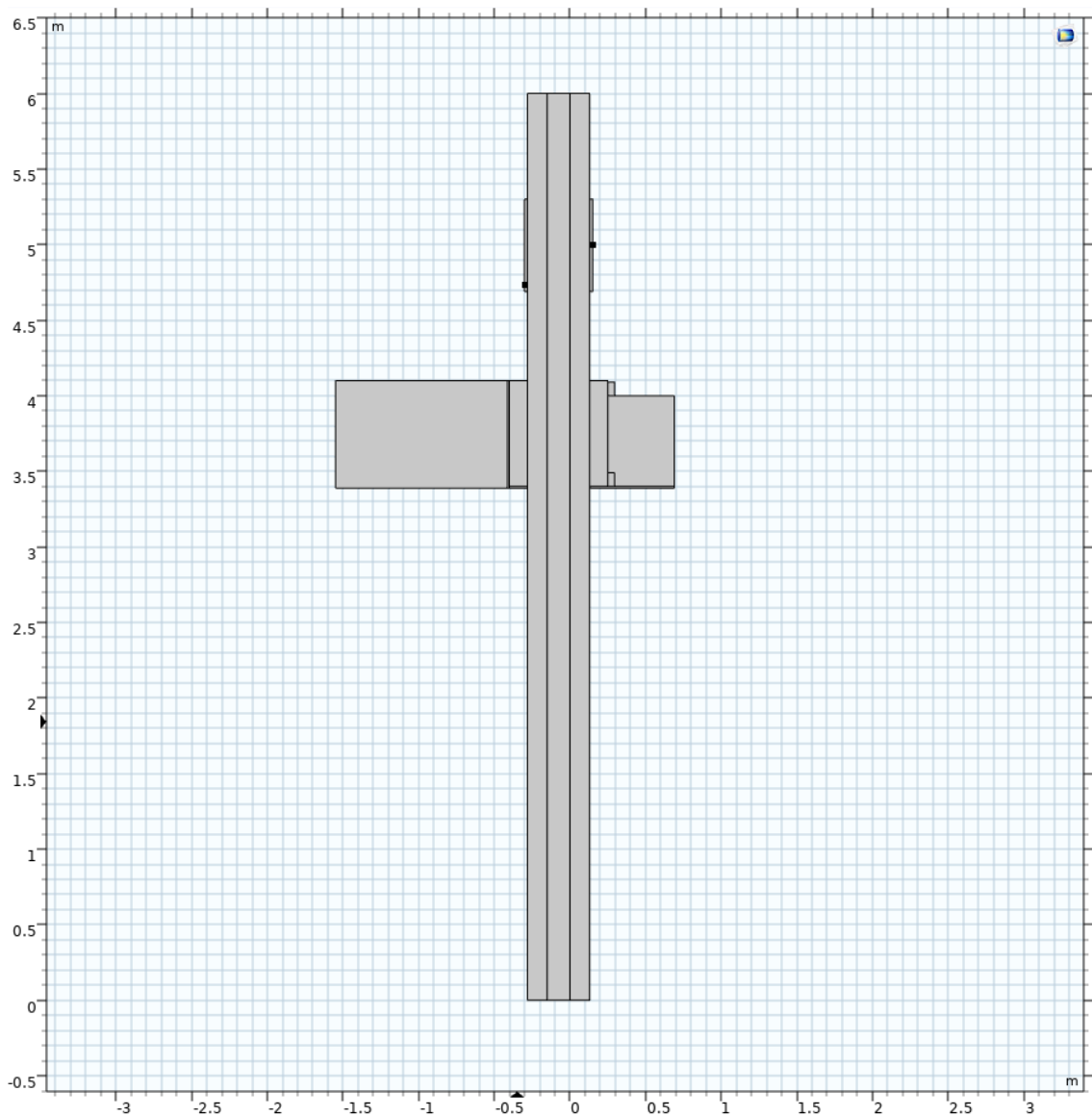
KUVA 2. Mallina käytetty rakennekuva

4.2.1 Geometrian luominen

Geometria voidaan tehdä käyttämällä ohjelman omia työkaluja tai vaihtoehtoisesti tuomalla CAD-ohjelmalla tehty malli ohjelmaan käyttämällä import-työkalua. Hyödyllinen ominaisuus ohjelmassa luodulla mallilla on se, että mallista voidaan tehdä niin sanotusti parametrinen, eli mallia voidaan muokata helposti muuttamalla parametrejä. Esimerkiksi eristeen leveyttä voidaan muuttaa helposti siten, että koko malli muuttuu sen mukana ja reunaehdoja ei tarvitse asettaa uudestaan.

Ohjelmassa mallit on mahdollista luoda joko yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisesti. (9, linkit Products -> Comsol Multiphysics.)

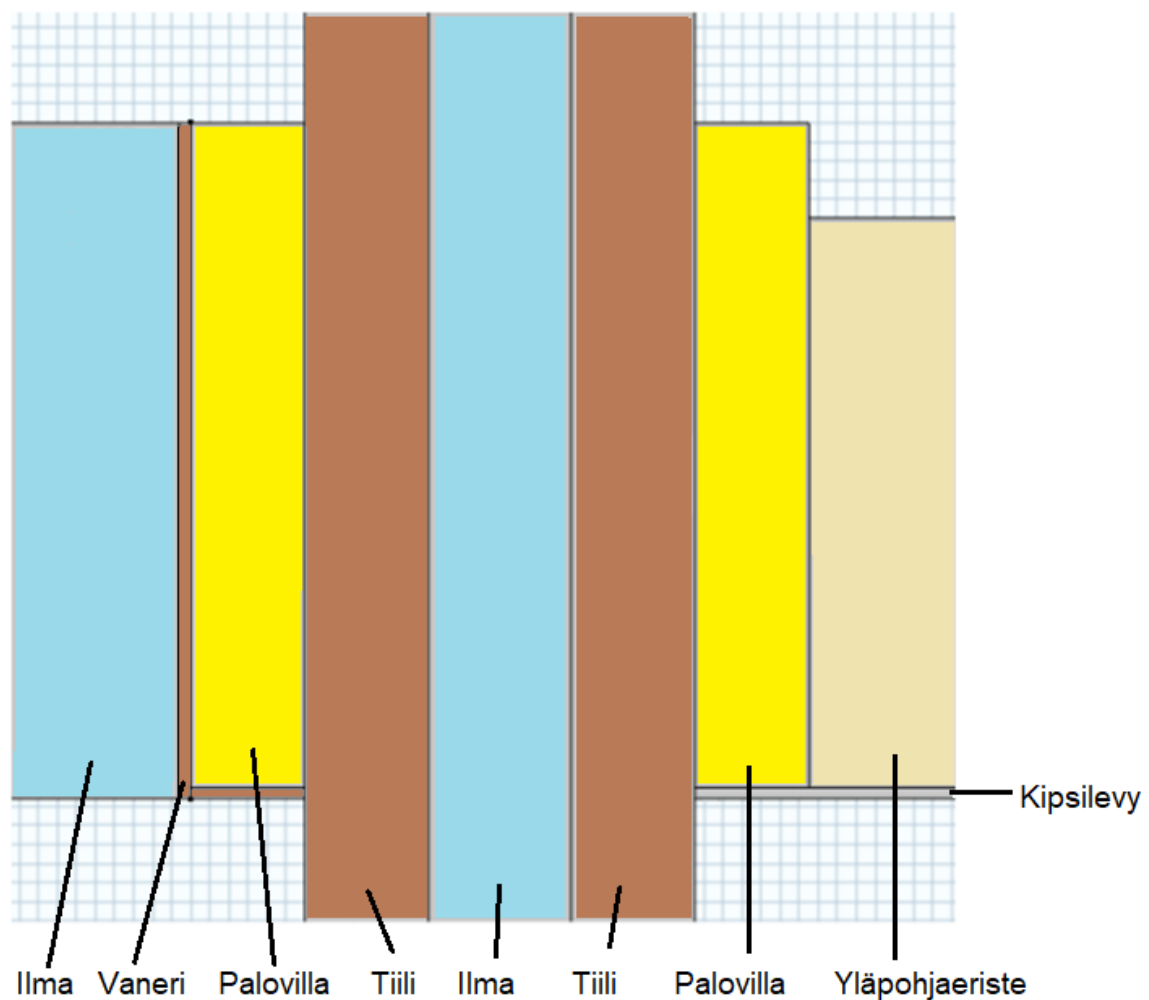
Tässä työssä geometria muodostettiin käyttämällä ohjelman omia työkaluja. Malliksi rakenteille saatiin rakennekuvia, joiden pohjalta geometria luotiin. Geometria luotiin kaksiulotteisesti yksinkertaistamisen vuoksi. Malli tehtiin myös parametrisiksi, jotta muokkaus olisi nopeampaa. Kuvassa 3 on esimerkki luodusta mallista.



KUVA 3. Comsol-ohjelmassa luotu malli

4.2.2 Materiaaliominaisuuksien asetus

Kun geometria saatiin muodostettua, määritettiin ohjelmaan kappaleille ominaisuudet. Materiaalit vaihtelivat eri rakennemallien mukaan. Materiaalien ominaisuuksien valintaan käytettiin joko saatujen materiaalien valmistajien antamia valmiita arvoja, Comsol-ohjelman tarjoamia arvoja tai yleisiä materiaaliarvoja RIL 255 -kirjasta. Kuvassa 4 esitetään, miten materiaalit asetettiin simulointimalliin yläpohjassa.



KUVA 4. Simulointimalli ja materiaalit

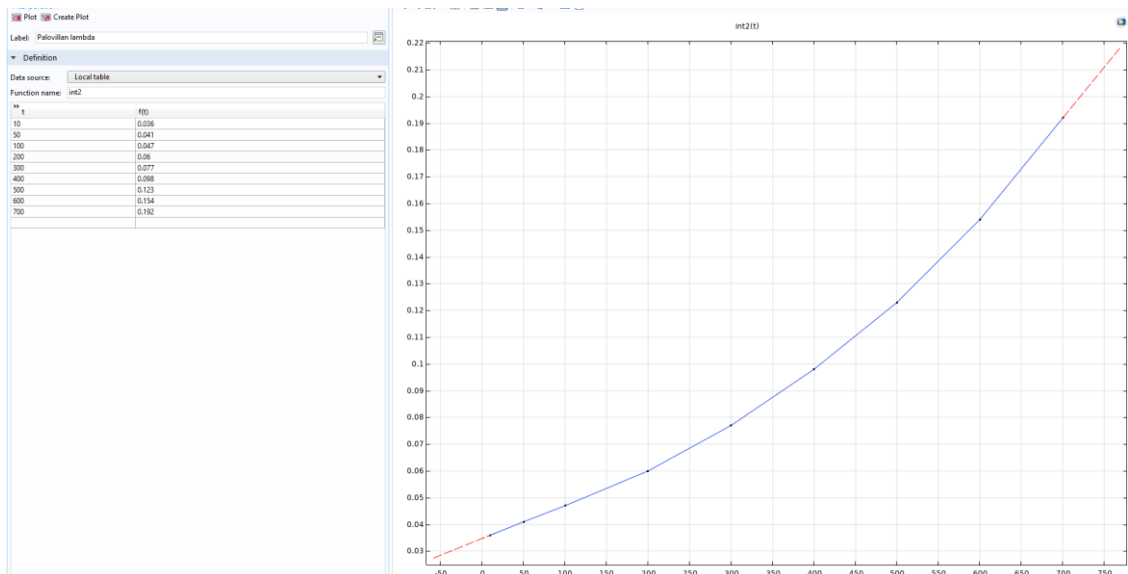
Taulukossa 1 esitetään malleissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia (lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti). Joistakin materiaaleista oli

saatavissa lämpötilan mukaan muuttuva lämmönjohtavuuden arvo. Simuloinneissa, jossa lämpötilaerot materiaalissa ovat suuria, olisi hyvä käyttää muuttuvia lämmönjohtavuuksia, jotta tuloksista saataisiin tarkemmat.

TAULUKKO 1. Simuloinneissa käytettyjen materiaalien ominaisuuksia

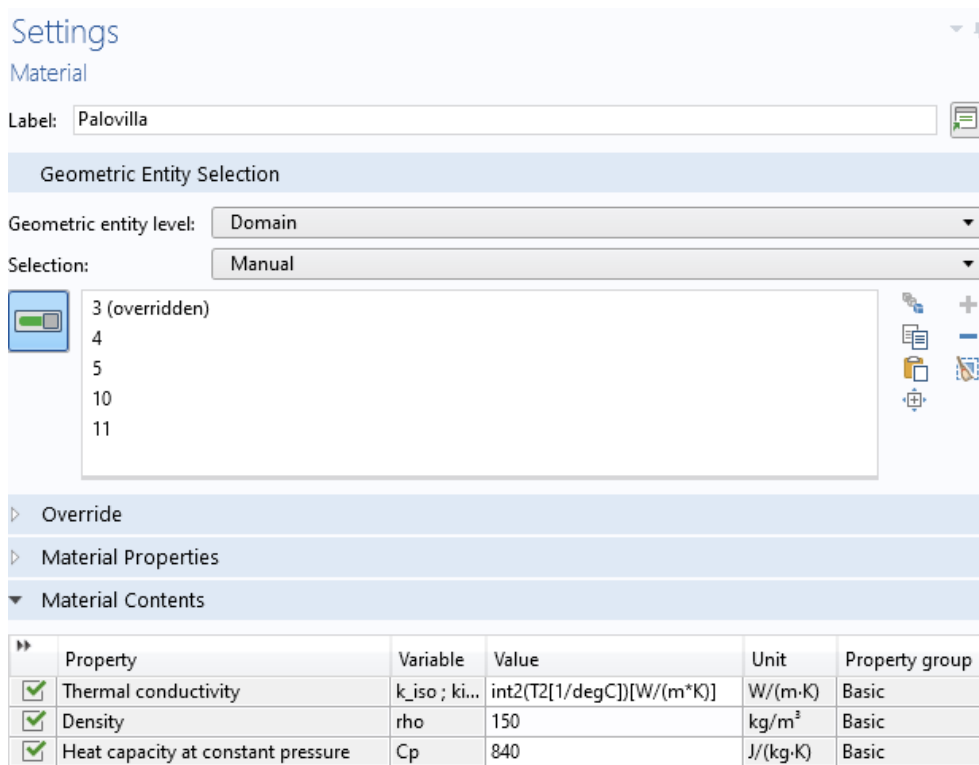
Materiaali	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Tiheys [kg/m ³]	Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]
Puu	0,14	550	1400
Tiili	0,55	1350	900
Vaneri	0,17	550	1210
Mineraalivilla	0,036 ... 0,159	100	840
Kipsilevy	0,21	574	1100
Isover Fireprotect 150 palovilla	0,036 ... 0,192	150	840
Weber Vetonit ML-5 muurauslaasti	0,77	1800	1000
Weber Unirender 414	0,45	1500	1000
Fescon kevytrappauslaasti	0,2	1400	1000
Isover Ultimate takkalevy	0,030 ... 0,145	95	850

Kuvassa 5 esitetään ohjelmaan asetetun palovillan muuttuvaa lämmönjohtavuuden kuvaajaa. Kuvaaja muodostettiin käyttämällä ohjelman interpolation-työkalua. Kuvaajassa vaaka-akselilla on lämpötila ja pystyakselilla lämmönjohtavuus.



KUVA 5. Palovillan lämmönjohtavuuskuvaaja Comsol-ohjelmassa

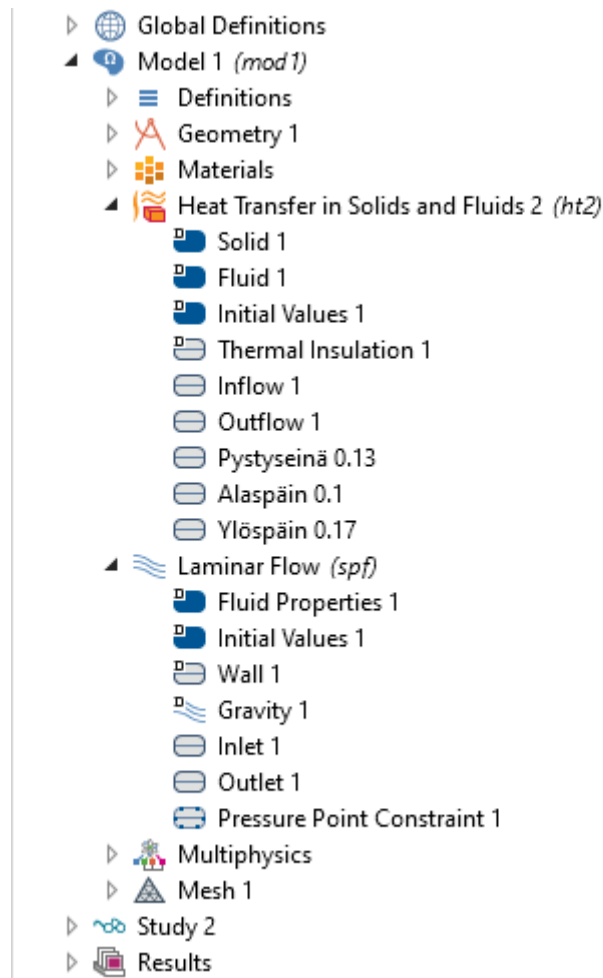
Kuvassa 6 esitetään, miten lämmönjohtavuuden arvo asetettiin materiaaliin. Koska lämmönjohtavuuden arvo ei ole vakio, se täytyy asettaa funktiona ohjelmaan.



KUVA 6. Palovillan ominaisuudet asetettu ohjelmaan

4.2.3 Käytetyt fysiikat

Laskenta suoritettiin ajasta riippuvassa tilassa. Simulointiajaksi tässä mallissa määritettiin 24 tuntia. Laskentaan käytettiin Heat Transfer in Solids and Fluids -fysiikkaa, koska siihen sisältyvät tarvittavat työkalut tämän mallin simulointiin. Toisena fysiikkana käytettiin Laminar Flow -fysiikkaa, jolla saatiin savukaasujen liike simuloitua hormissa. Ohjelma muodostaa automaattisesti monifysiikkamallin, joka yhdistää käytetyt fysiikat. Tässä laskennassa ei oteta kosteuden vaikutusta huomioon mallin yksinkertaistamiseksi. Hormin oletetaan myös olevan tiivis, eli ilmaa ei vuoda hormin seinämien läpi. Kuvassa 7 esitetään Comsol-ohjelman reunapalkkia, kun kaikki fysiikat ja reunaehdot oli asetettu.



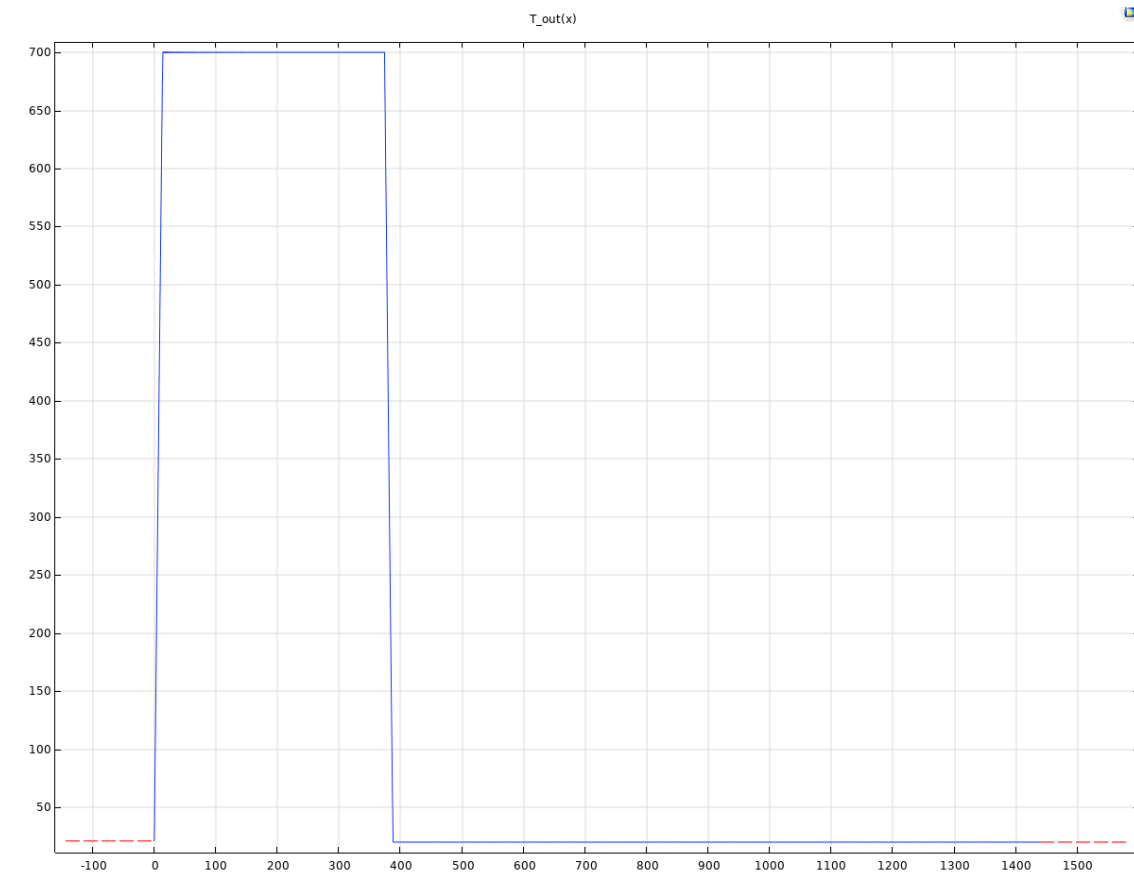
KUVA 7. Käytetyt fysiikat ja reunaehdot

4.2.4 Reunaehtojen asetus

COMSOL Multiphysics 5.5 tarjoaa suuren määrän eri reunaehtoja käytettäväksi. Soveltuvien reunaehtojen määrittäminen voi olla haasteellistakin varsinkin, jos simulointimalli on monimutkainen.

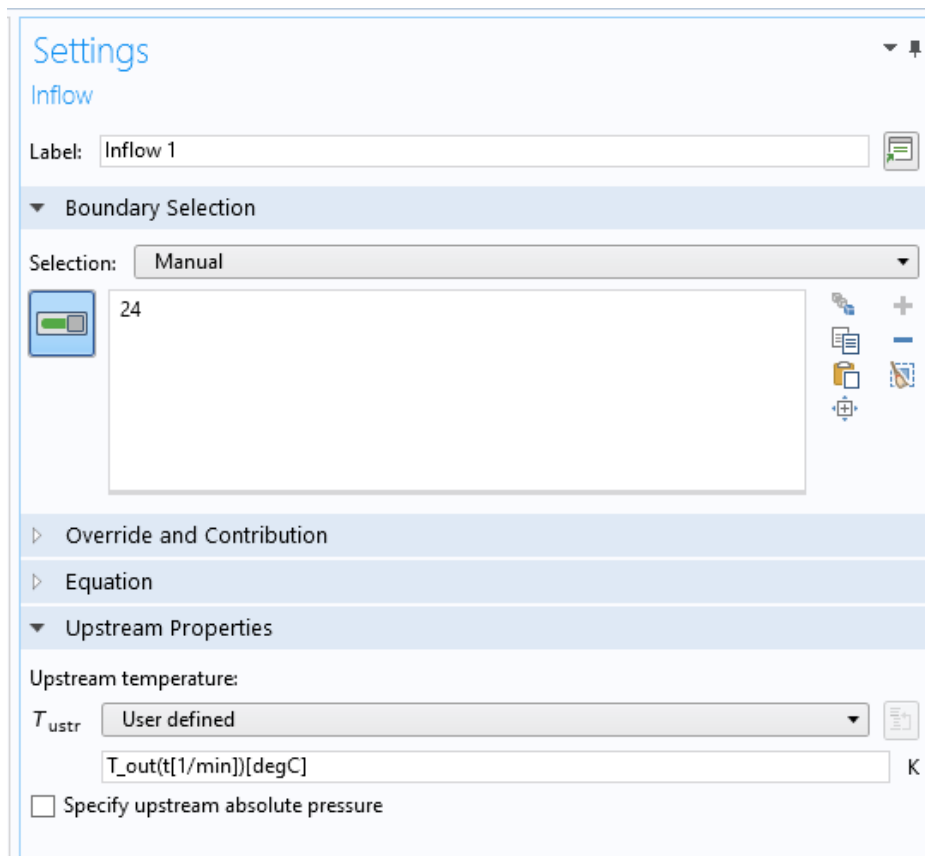
Simulointi suoritettiin aluksi siten, että olosuhteet vastaisivat standardin mukaisia olosuhteita. Ympäröivän ilman lämpötilaksi asetettiin tällöin 20 °C. Palokaasujen lämpötilaksi asetettiin aluksi polttotestimallista saatu sensoridata mallin oikeellisuuden tarkistamisen ajaksi. Kun siirryttiin erilaisten rakenteiden simulointiin, vaihdettiin palokaasujen lämpötilaksi standardin mukaiset lämpötilat. Standardissa palokaasujen lämpötilaa nostetaan 50 °C minuuttissa, kunnes saavutetaan maksimilämpötila 700 °C. Lämpötilaa pidetään yllä kuusi tuntia. Standardissa on

määritetty myös palokaasujen virtausnopeus 5,7 m/s. (5, s. 20.) Kuvassa 8 esitetään palokaasujen lämpötilakuvaaja. Kuvaajassa pystyakselilla on lämpötila ja vaaka-akselilla aika minuutteina.



KUVA 8. Palokaasujen lämpötilakuvaaja

Ohjelmaan tulee myös asettaa reunat, joista ilma kulkeutuu sisään ja ulos. Alapäähän asetettiin inlet- ja inflow-reunaehdot, yläpäähän outlet- ja outflow-reunaehdot. Reunat asetettiin savuhormin ylä- ja alapäähän. Ilman nopeudeksi asetettiin 5,7 m/s. Palokaasujen lämpötila asetettiin inflow-reunaehtoon. Kuvassa 9 esitetään, miten lämpötila asetettiin reunaehtoon. Lämpötilan arvo tulee asettaa funktiona, koska se ei ole vakio.



KUVA 9. Lämpötila asetettu inflow-reunaehtoon

Comsol-ohjelma asettaa reunat, joille ei ole määritetty mitään reunaehtoa, automaattisesti adiabaattisiksi. Adiabaattinen reuna tarkoittaa sitä, että lämpö ei pääse virtaamaan sen yli sisään tai ulos.

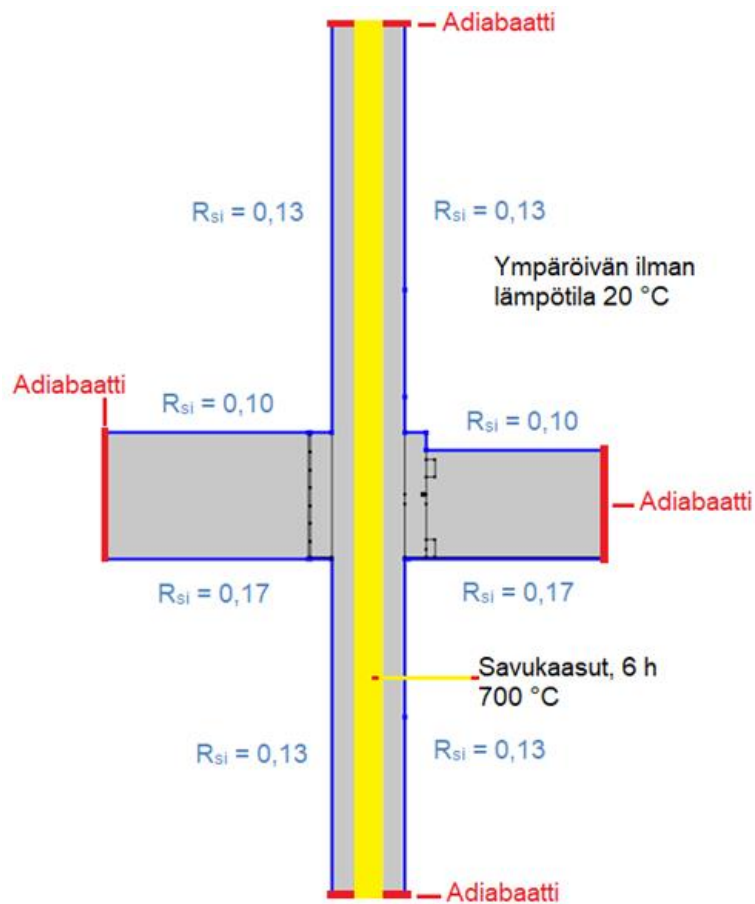
Simulointeja tehtiin myös sellaisissa tilanteissa, joissa ulkopintojen lämpötiloja muutettiin tilanteeseen, jossa pintalämpötilat vesikatossa ja ullakkotilassa ovat korkeammat. Kesähelteellä on mahdollista, että aurinko lämmittää katon todella kuumaksi, joten vesikaton yläpuolella olevan ilman lämpötilaksi määriteltiin 60 °C ja ullakkotilan ilman lämpötilaksi määritettiin 40 °C. Huoneilman lämpötila pysyi 20 °C:ssa.

Pintojen pintavastusten (R_{si} ja R_{se}) osalta noudatettiin taulukon 2 mukaisia arvoja. Pintavastusten asettamisessa täytyy huomata arvon muuttuminen, kun lämpövirran suunta vaihtuu.

TAULUKKO 2. Pintavastusten (R_{si} ja R_{se}) arvot (4, s.20)

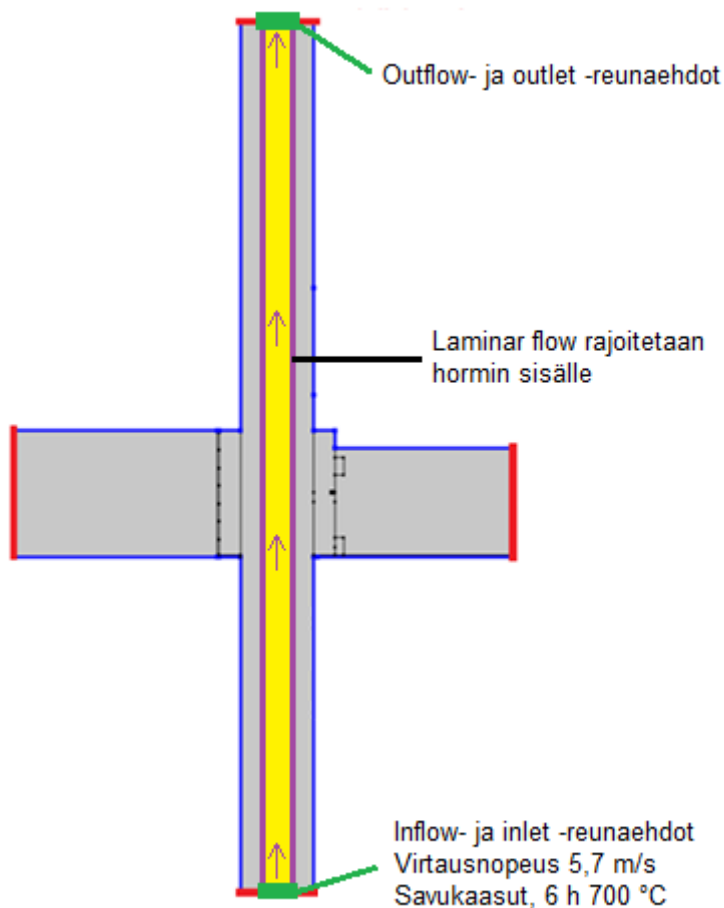
Pintavastus [m^2K/W]	Lämpövirran suunta ylöspäin	Lämpövirran suunta vaakasuoraan	Lämpövirran suunta alaspäin
sisäpuolen pintavastus (R_{si})	0,10	0,13	0,17
ulkopuolen pintavastus (R_{se})	0,04	0,04	0,04

Hormirakennetta ja asetettuja reunaehtoja esitetään kuvassa 10. Reunaehtojen asettamisessa tulee olla tarkka, koska pienetkin virheet voivat vaikuttaa lopputulokseen merkittävästi.



KUVA 10. Reunaehtojen asettelu Comsol-ohjelmassa

Kuvassa 11 esitetään mihin virtauksen simuloimiseen tarvittavat reunaehdot on asetettu simulointimallissa. Hormin alapäähän asetetaan savukaasujen lämpötila ja virtausnopeus. Virtaus rajoittuu todennäköisesti automaattisesti hormin sisälle, jos geometria on luotu oikein ja inflow- sekä outflow -reunaehdot on asetettu hormin ala- ja yläpäähän.



KUVA 11. Virtausten reunaehdot asetettu Comsol-ohjelmaan

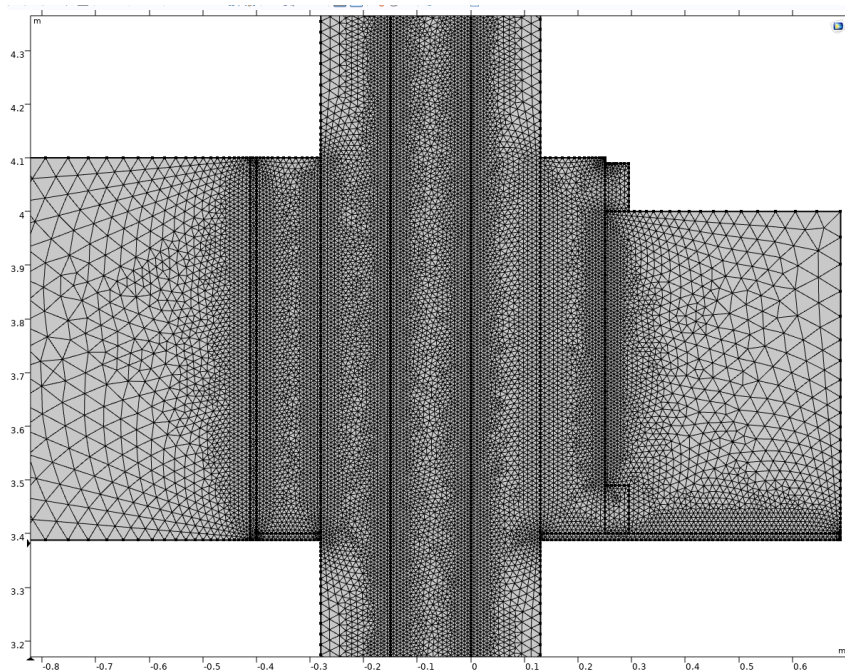
4.2.5 Laskentaverkon määrittäminen

Comsol-ohjelma luo automaattisesti laskentaverkon malleihin, jos sitä ei erikseen määritetä. Ohjelmassa on mahdollista määrätä ohjelma määrittämään verkon tiheys, joko automaattisesti valitsemalla vain verkon tiheys tai manuaalisesti parametreja muuttamalla. Laskentaverkon tiheys vaikuttaa laskentatarkkuuteen ja

laskennankestoon oleellisesti. Tiheällä verkolla laskenta kestää kauemmin ja tulostiedoston koko kasvaa, mutta tulos on tarkempi. (9, linkit Products -> Comsol Multiphysics.)

Tässä työssä laskentaverkon tiheys pyrittiin pitämään samanlaisena eri simuloitimalleissa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Laskentaverkko muodostettiin siten, että se on tiheä paikoissa, joissa sen tiheydellä on suuri merkitys. Laskentaverkon tiheyttä pienennettiin paikoissa, joissa tiheydellä oli pienempi merkitys. Esimerkiksi hormin seinämissä ja eristeessä hormin vierellä verkko on erittäin tiheä, toisin kuin yläpohjaeristeen keskellä.

Tehostamalla laskentaverkkoa laskennan pituutta ja tulostiedoston kokoa saatiin pienennettyä menettämättä laskentatarkkuutta tärkeämmissä kohdissa. Kuvassa 12 esitetään laskentaverkkoa Comsol-ohjelmassa.



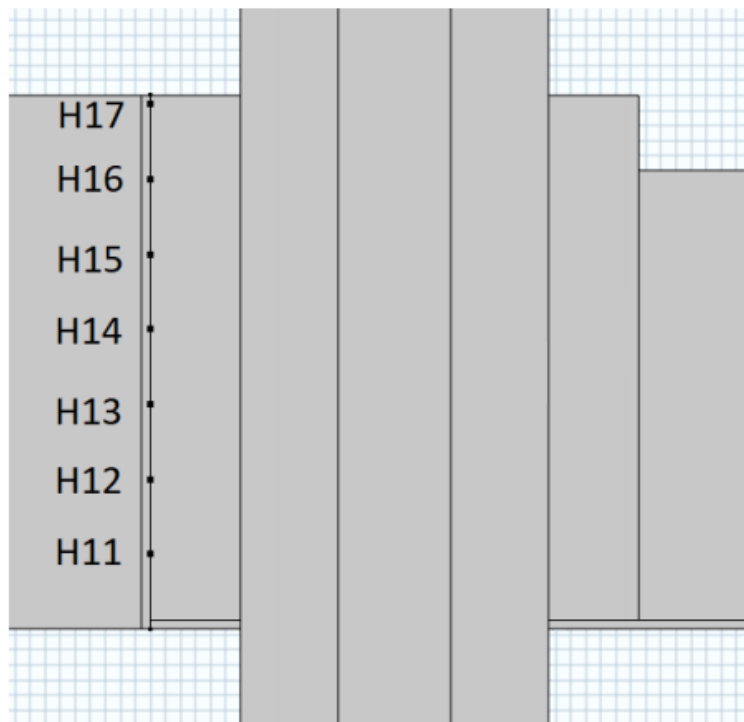
KUVA 12. Muodostettu laskentaverkko

5 SIMULOINTITULOSTEN ANALYSOINTI

Simuloinnin jälkeen selvitettiin ihan ensimmäiseksi, ovatko Comsol-ohjelmasta saadut simulointitulokset luotettavia. Tuloksia verrattiin aluksi polttotestin tuloksiin, minkä jälkeen voitiin siirtyä erilaisten rakenteiden simuloimiseen.

5.1 Polttotestimalli

Simulointimallin oikeellisuuden tarkistamiseen käytettiin Eurofins Expert Servicen tekemän polttotestin tuloksia. Simulointimallin geometria, materiaaliominaisuudet ja reunaehdot pyrittiin tekemään mahdollisimman yhteneväiseksi palotestissä käytetyn hormin kanssa. Palokaasujen lämpötilaksi asetettiin polttotestistä saadut sensoridatat palokaasuista. Simulointimallissa sijoitettiin mittauspisteitä palovillan ulkopinnan ja vaneriseinän väliin. Mittauspisteiden paikat esitetään kuvassa 13. Mittauspisteitä oli myös palovillan ja tiilimuurauksen välissä, palovillan sisällä ja muurauksen pinnassa välipohjarakenteen yläpuolella. Mittauspisteiden sijainnit valittiin polttotestin perusteella.



KUVA 13. Mittauspisteiden asettelu

Taulukossa 3 on esitetty simuloinnilla saadut tulokset. Taulukossa on myös vertailtu tuloksia polttotestin tuloksiin. Maksimilämpötilassa rakenteen keskellä päästään erittäin lähelle polttotestin tulosta, mutta rakenteen reunamilla olevilla mittauspisteillä ero kasvaa, mikä johtuu todennäköisesti simulointimallin yksinkertaistamisesta. Tärkeintä oli kuitenkin päästä maksimilämpötilassa mahdollisimman lähelle. Tiilimuurauksen pinnassa päästiin myös erittäin lähelle polttotestin tuloksia, mikä osoittaa, että reunaehdot määritettiin oikein.

TAULUKKO 3. Maksimilämpötiloja mittauspisteissä

	Simulointitulokset	Palotesti	ero prosentteina
H11	54,1	67,2	19 %
H12	69,6	62,4	11 %
H13	75,9	67,5	12 %
H14	76,4	75,9	1 %
H15	71,3	75,3	5 %
H16	58,4	67,1	13 %
H17	27,6	57,2	52 %
Extra 2 100mm piipusta	133,7	112,8	19 %
900 mm välipohjan alap. ylöspäin	122,8	121,8	1 %
1500 mm välipohjan alap. ylöspäin	117,6	113,3	4 %
Piipun ja villan väli	241,7	244,0	1 %

Tulosten perusteella päätettiin, että malli antaa tarpeeksi tarkkoja arvoja ja reunamilla havaituista lämpötilaeroista ei välitetäisi. Simulointimallia voidaan sen perusteella soveltaa erilaisten rakenteiden simuloimiseen.

5.2 Yläpohjaliittymärakenteet 1, 2 ja 3

Yläpohjassa simulointeja tehtiin palovillan eri paksuuksilla. Simulointimalli on muuten sama kuin polttotestimallissa käytetty, mutta eristepaksuutta on muutettu. Rakenteessa 1 käytettiin palovillan paksuutta 100 mm, rakenteessa 2 palovillan paksuutta 110 mm ja rakenteessa 3 palovillan paksuutta 120 mm.

Simulointitulokset on ilmoitettu taulukossa 4. Taulukossa ovat mukana vain tärkeimmät pisteet palovillan keskialueelta. Simuloinnit tehtiin vertailun vuoksi kahdella eri palokaasujen lämpötilalla, polttotestin lämpötiloilla, jossa lämpötila oli hieman korkeampi kuin standardissa vaaditaan, sekä standardin mukaisella lämpötilalla.

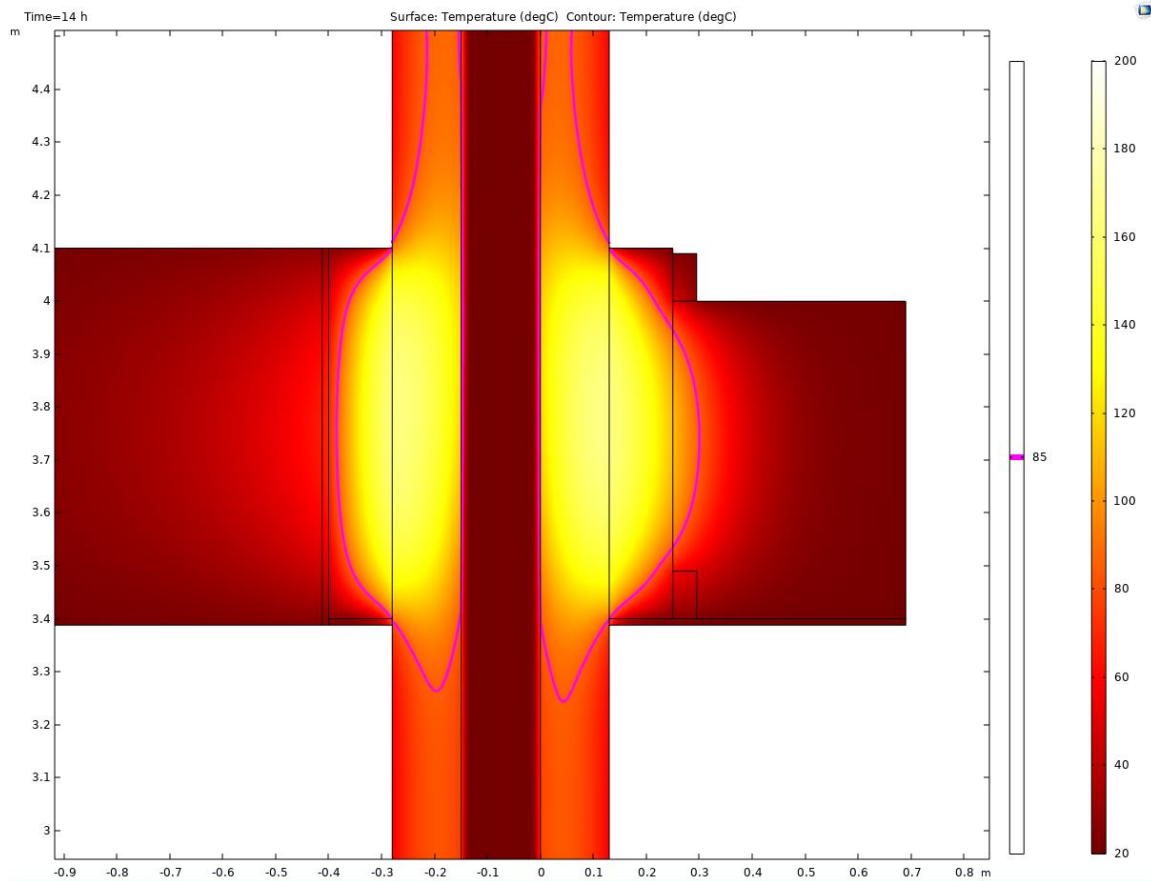
TAULUKKO 4. Maksimilämpötiloja mittauspisteissä yläpohjassa

Palovillan paksuus	Simulointitulokset (palotestin lämpötilat piipussa 735 °C)			Standardin mukainen lämpötila (6h 700 °C)		
	100	110	120	100	110	120
H12	78,7	73,2	69,5	76,7	72,7	68,5
H13	85,5	79,7	75,9	83,3	79,1	74,7
H14	86,0	80,1	76,4	83,8	79,6	75,2
H15	80,4	74,9	71,3	78,4	74,4	70,2

Tarkoituksena oli selvittää, voiko palovillan määrässä poiketa asetuksesta, jossa on määrätty palovillan vahvuudeksi vähintään 120 mm, kun yläpohjassa eriste-paksuus on enemmän kuin 300 mm. Raja-arvona käytetään lämpötilaa 85 °C, koska puu ei kuulu A1-luokan materiaaleihin. (6, s. 105; 8, s. 11.)

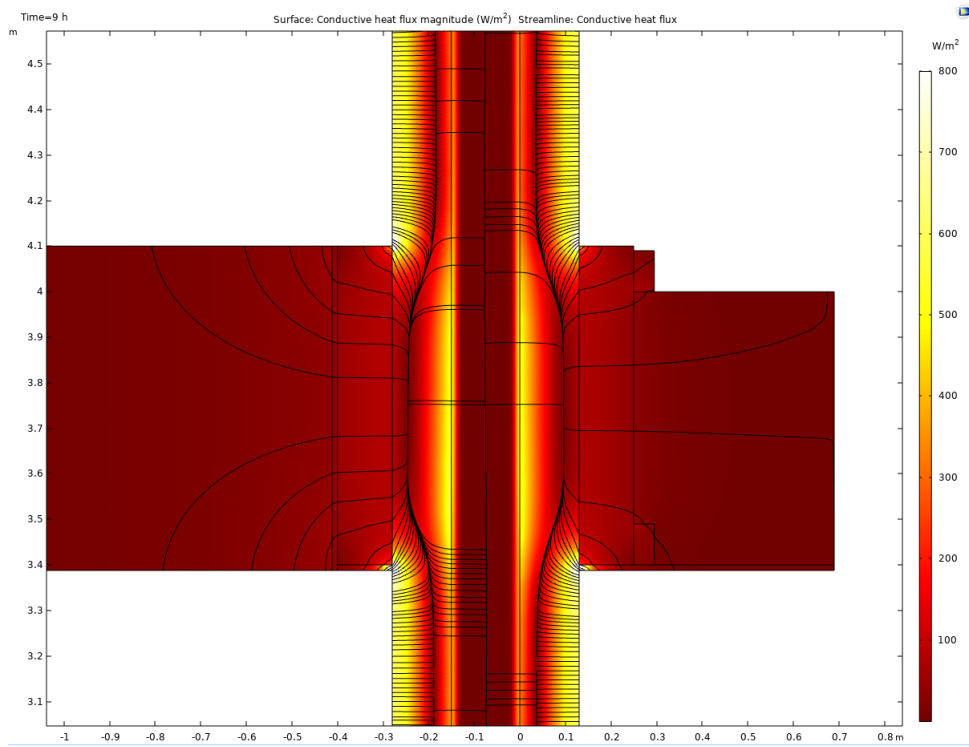
Simulointien perusteella rakenteella 1 maksimilämpötila alittaisi raja-arvon niukasti reilulla asteella. Rakenteilla 2 ja 3 päästään reilusti raja-arvon alapuolelle. Karkeasti arvioiden 10 mm:n vähennys palovillassa nosti lämpötiloja vanerilevyn pinnassa noin 5 °C.

Kuvassa 14 esitetään yläpohjarakenteen lämpötilajakauma, kun rakenne on kuumimmillaan, noin 8 tuntia lämmityksen lopetuksen jälkeen. Paremmen eristetyllä puolella lämpötilat nousevat merkittävästi korkeammaksi kuin puolella, jossa palovillan vastassa on vaneriseinä.



KUVA 14. Lämpötilajakauma rakenteessa

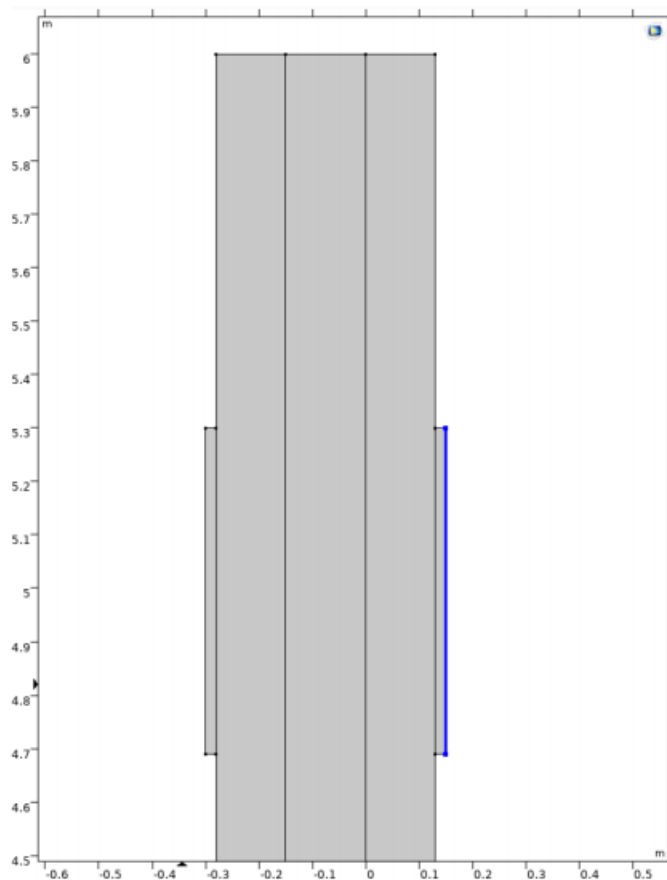
Lämpövirran tiheyttä rakenteessa esitetään kuvassa 15. Mitä tiheämpi viivasto on, sitä enemmän lämpöä virtaa. Kuvassa ilmenee selkeästi, miten eristys vaikuttaa rakenteen jäähtymiseen.



KUVA 15. Lämpövirtaus rakenteessa

5.3 Vesikattoliittymärakenteet 1 – 7

Vesikattoliittymärakenteita oli kaikkiaan 7 erilaista. Rakenteiden eristemateriaalit valittiin tilaajan toivomusten perusteella. Vesikattoliittymärakenne on esitetty kuvassa 16. Simulointimallissa savuhormin korkeus on 6 m ja vesikatoneristeen keskikohta sijaitsee 5 m:n korkeudessa. Eristeen korkeus on 610 mm. Vesikatto 5 m:n korkeudessa on yleinen ratkaisu, joten sitä käytettiin näissä simuloinneissa. Kattorakenteita ei lisätty malliin, koska ne eivät yleensä ole kiinni pihassa.



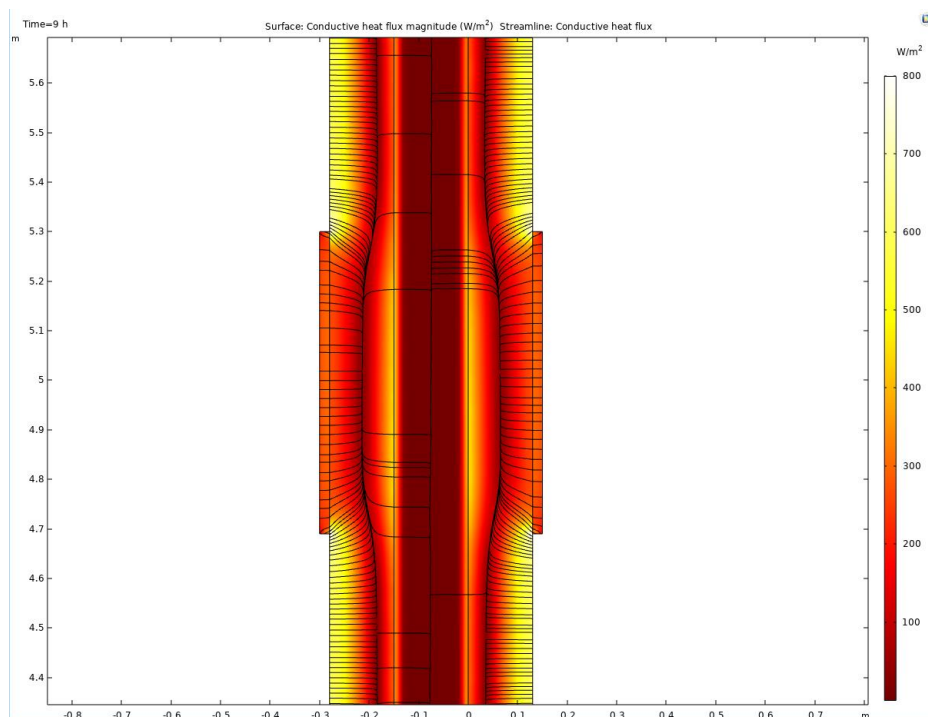
KUVA 16. Vesikattorakenne

Rakenteet ja maksimilämpötilat eristeen pinnassa on esitetty taulukossa 5. Vain eristemateriaali tai sen paksuus vaihtuu eri rakenteissa, joten tulokset ovat hyvinkin vertailukelpoisia.

Taulukko 5. Maksimilämpötiloja vesikaton eristyksessä

Rakenne	Eistemateriaali	Maksimilämpötila testin aikana
1	20 mm Weber Vetonit ML-5 Rappauslaasti	101,7
2	20 mm Weber Vetonit ML-5 lambda 0,67	96,6
3	20 mm Weber Unirender 414	92,5
4	20 mm Fescon kevytrappauslaasti	85,9
5	20 mm Isover Fireprotect 150 palovilla	60,6
6	10 mm Isover Fireprotect 150 palovilla	77,1
7	10 mm Isover Ultimate takkalevy	70

Huonoimman ja parhaan rakenteen välillä vallitsee melko suuri lämpötilaero. Paras rakenne oli rakenne 5, jossa eristeen pintalämpötilaksi saatiin 60,6 °C. Huonoin rakenne oli rakenne 1, jossa eristeen pintalämpötilaksi saatiin 101,7 °C. Rakenteen lämpövirtausta esitetään kuvassa 17.



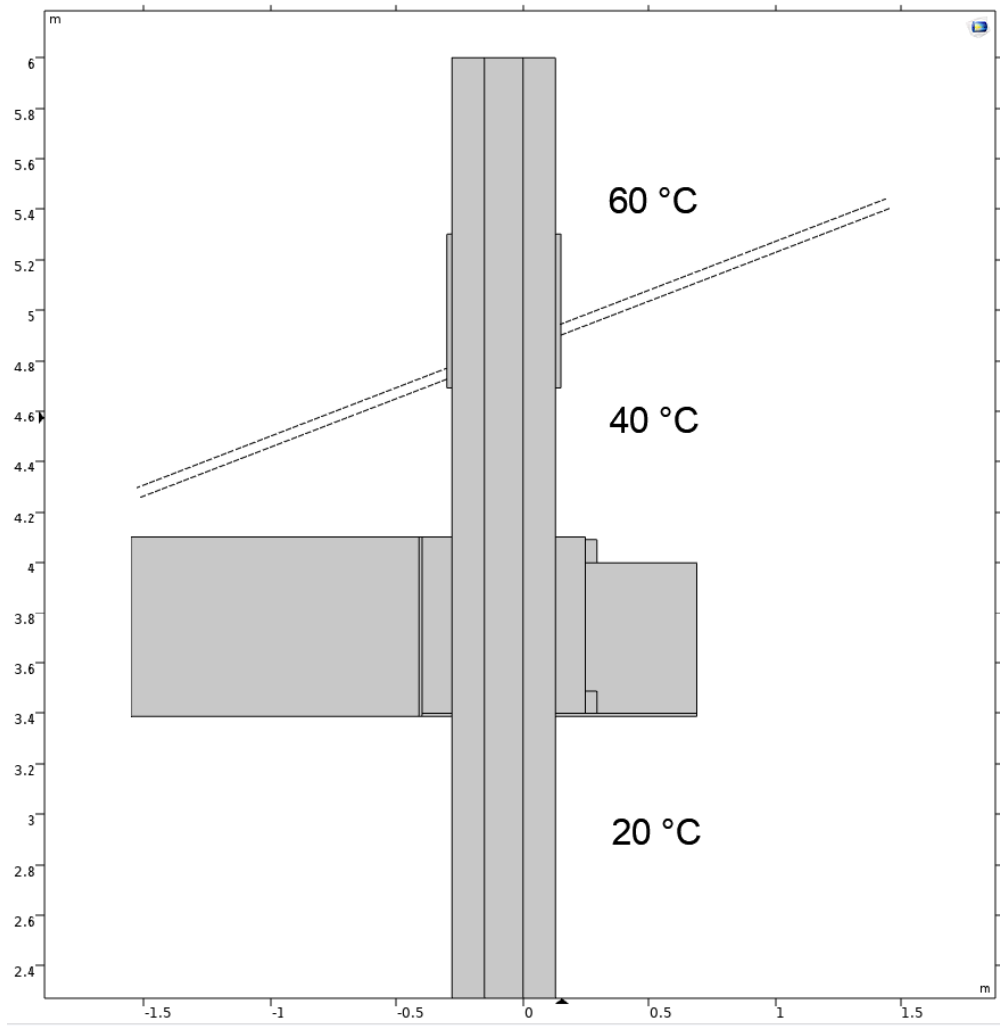
KUVA 17. Lämpövirtaus vesikatossa

Tulosten perusteella joko 10 mm takkalevyä tai palovillaa riittäisi eristeeksi, jotta aluskate varmasti kestäisi lämpörasituksen. Toisaalta, jos tiedetään aluskatteen lämpötilankesto ja savuhormi on riittävän pitkä, on mahdollista käyttää esimerkiksi rappauslaastia eristeenä. Monet aluskatteiden valmistajat eivät kuitenkaan ilmoita lämmönkestävyyttä, joillakin aluskatteilla voi lämmönkestävyys olla 120 °C, kun taas toisilla 80 °C.

Simulointituloksia ei voitu kuitenkaan verrata mihinkään, koska vesikatosta ei ole saatavilla polttotestituloksia. Simuloinnit tehtiin samoilla reunaehdoilla ja mallilla kuin verifioitu yläpohjaliittymäsimulaatio. Tulokset ovat siis vähintäänkin suuntaa antavia.

5.4 Yläpohja vaihtoehtoisessa tilanteessa

Hormirakenteella tehtiin myös simulaatioita tilanteissa, joissa pintalämpötiloja muutettiin vesikatossa ja ullakkotilassa. Asetetut lämpötilat ovat teoreettisia ja nämä simuloinnit ovat mukana vain vertailun vuoksi. Ullakkotilassa pintalämpötilaksi asetettiin 40 °C, vesikaton yläpuolella tiilimuurauksen pintalämpötilaksi asetettiin 60 °C. Kuvassa 18 esitetään simuloinnissa käytettyä hormirakennetta. Katkoviivalla on merkitty, mihin vesikate tulisi, jos se olisi mukana simuloinnissa.



KUVA 18. Hormirakenne ja asetetut pintalämpötilat

Yläpohjassa ei oikeastaan tapahtunut suuria muutoksia, kun pintalämpötiloja muutettiin. Muutokset ovat pieniä, koska eristettä on melko paksusti yläpohjassa. Taulukossa 6 esitetään simulointituloksia yläpohjassa. Taulukossa korkeammilla pintalämpötiloilla tehdyt simuloinnit on merkitty R-kirjaimella. Jotta tuloksia voitaisiin verrata, on mukana ovat standardiolosuhteissa tehtyjen simulointien tulokset.

TAULUKKO 6. Maksimilämpötiloja yläpohjassa

	100 mm palovilla	120 mm palovilla
[R] Vanerin pinta	89,6	79,3
[R] Hormin pinta palovillan alla	222	221
[R] Palovillan ulkopinta	130	116
Vanerin pinta	82,6	70,9
Hormin pinta palovillan alla	223	220,1
Palovillan ulkopinta	127,4	112,3

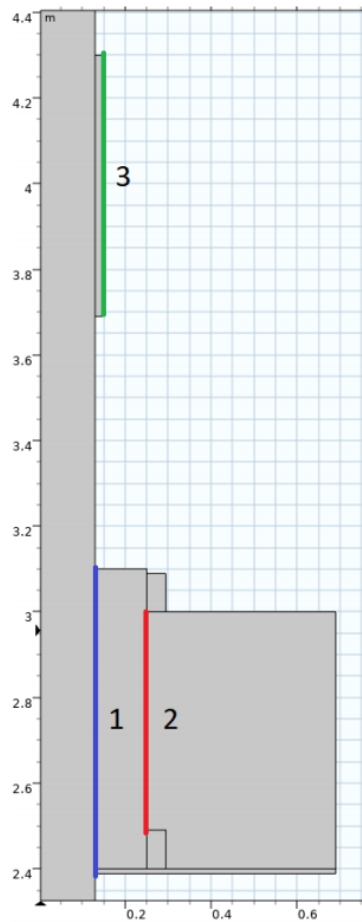
Taulukossa 7 esitetään vesikattoeristeen maksimi pintalämpötiloja. Korkeammilla pintalämpötiloilla tehdyt simuloinnit on merkitty R-kirjaimella. Erot ovat suurempia vesikatossa, koska eristeet ovat melko ohuita. Pintalämpötilat nousivat melkein 30 °C, kun pintalämpötiloja nostettiin.

TAULUKKO 7. Maksimilämpötilat vesikattoeristeen pinnassa

Eistemateriaali	Maksimilämpötila
[R] 20 mm Weber Vetonit ML-5 Rappauslaasti	128
[R] 20 mm Isover Fireprotect 150 palovilla	94,9
20 mm Weber Vetonit ML-5 Rappauslaasti	101,7
20 mm Isover Fireprotect 150 palovilla	60,6

5.5 Savuhormin pituuden vaikutus lämpötiloihin

Savuhormin pituudella on suuri vaikutus lämpötiloihin, koska liittymät ovat ylempänä ja hormi pääsee tehokkaammin jäähtymään. Esimerkiksi 2-kerroksisen talon yläpohjaliittymässä lämpötilat ovat selvästi alempana kuin 1-kerroksisen. Kuvassa 19 esitetään, mistä kohdista lämpötiloja on mitattu. Lämpötilojen mittaukseen käytettiin ohjelman Line maximum -työkalua, jolla saadaan maksimilämpötila valitun linjan kohdalta.



KUVA 19. Maksimilämpötilojen mittauslinjat

Simulointeja tehtiin kolmella eri hormikorkeudella. Taulukossa 8 esitetään maksimilämpötiloja esitetyissä mittauslinjoissa.

TAULUKKO 8. Maksimilämpötiloja mittauslinjoissa

		Maksimilämpötila testin aikana		
		5 m	6 m	8 m
Hormin pinta palovillan alla	1	225,4	216,7	198,5
Palovillan ulkopinta	2	115,6	111,8	102,3
Vesikaton eristeen ulkopinta	3	102,1	98,1	91,1

Mallit muodostettiin siten, että vesikatoneristeen keskikohdan etäisyys piipun päästä oli 1 m. Vesikaton eristeen alareunan ja yläpohjan eristeen yläreunan väli on 0,6 m. Etäisyydet pidettiin samoina eri pituisissa hormoneissa vertailun vuoksi.

Tuloksien perusteella rakenne viilentyy selvästi, kun hormi pitenee. Hormin ja palovillan välissä mittauslinjassa 1, 5 m korkean ja 8 m korkean hormin välillä vallitsee 25 °C:een ero. Palovillan ulkopintojen lämpötilaero on hiukan pienempi noin 14 °C. Pienin ero lämpötiloissa vallitsee vesikatossa, jossa lämpötilaeroksi saatiin noin 11 °C. Karkeasti arvioiden palovillan ulkopinnassa ja vesikaton eristeen ulkopinnassa lämpötila laskee noin 4 °C aina kun pituutta lisättiin metri.

6 YHTEENVETO

Tiukentuneet palomääräykset ovat ajaneet savuhormien valmistajat testaamaan savuhormirakenteita. Polttotestien suorittaminen on kallista ja niiden tekeminen vie paljon aikaa. Simuloimalla lämpötilatarkastelu helpottuu merkittävästi verrattuna polttotestin tekemiseen, koska simuloinnissa ei tarvitse fyysisesti rakentaa mitään ja rakenteita on helppo muokata.

Tavoitteena tässä opinnäytetyössä oli tarkastella lämpötiloja savuhormin ympärillä yläpohja- ja vesikattoliittymissä. Vertailussa yläpohjarakenteita oli kolme ja vesikattorakenteita seitsemän. Simulointeja tehtiin myös muuttamalla savuhormin korkeutta sekä muuttamalla ympäristöolosuhteita. Simuloinnit toteutettiin Comsol Multiphysics 5.5 -ohjelmalla.

Ensimmäisenä täytyi luoda toimiva simulointimalli, jonka oikeellisuus tarkistettiin vertailemalla siitä saatuja tuloksia polttotestistä saatuun sensoridataan. Simulointimallin todettiin antavan luotettavia tuloksia rakenteen keskellä, missä lämpötilat ovat korkeammillaan. Rakenteen reuna-alueilla tulokset eroavat polttotestin tuloksista, koska mallia jouduttiin yksinkertaistamaan. Päätettiin kuitenkin, että mallia voidaan käyttää, koska tulokset olivat lähellä todellisuutta kriittisellä alueella rakenteen keskellä.

Toimivaksi todettua simulointimallia sovellettiin yläpohjassa, jossa simulointeja tehtiin muuttelemalla palovillan paksuutta hormin vierellä. Lämpötiloja tarkasteltiin mittauspisteissä rakenteen keskellä palovillan pinnassa. Tarkoituksena oli selvittää, onko yläpohjassa mahdollista käyttää pienempää eristepaksuutta, kuin 120 mm.

Vesikattoliittymässä tarkoituksena oli selvittää, kuinka korkeaksi lämpötilat nousevat eristepinnassa testin aikana erilaisilla rakenteilla. Lämpötilat voivat nousta melko korkeiksi, jos hormi on lyhyt ja huonosti eristetty. Kaikki kattomateriaalit eivät kestä siellä vallitsevia lämpötiloja, jos ne kiinnitetään hormiin.

Piipun pituudella on olennaisesti merkitystä vesikatossa vallitseviin lämpötiloihin. Simulointeja tehtiin kolmella eri hormin korkeudella ja maksimilämpötiloja mitattiin savuhormin pinnasta, palovillan pinnasta ja vesikattoeristeen pinnasta.

Simulointeja tehtiin myös simulointimallilla, jossa pintalämpötiloja muutettiin korkeammiksi vesikatossa ja ullakkotilassa. Tilanne on mahdollinen kesällä, jolloin aurinko lämmittää taloa. Valitut arvot ovat kuitenkin teoreettisia ja simuloinnit tehtiin vain vertailun vuoksi.

Simulointien perusteella yläpohjassa olisi mahdollista käyttää pienempää eristevahvuutta kuin asetuksessa määrätään tällä hetkellä. Lämpötilat alittavat niukasti asetetun raja-arvon halutulla 100 mm:n paksuisella eristyksellä hormin vierellä. Kapeampi hormirakenne tekisi tiilimuuratun hormin rakentamisesta hiukan kustannustehokkaamman, koska eristemateriaalia tulisi vähemmän. Kapeampi rakenne helpottaisi myös kattotuolien asennusta.

Vesikatossa rajoittavaksi tekijäksi osoittautuu aluskate, joka asennetaan yleensä hormiin kiinni. Erilaisia aluskatemateriaaleja on paljon ja niiden lämpötilakestävyys kannattaa varmistaa ennen sen valintaa. Esimerkiksi Divoroll Universal 2S -aluskatteen lämpötilakestävyudeksi on ilmoitettu 80 °C, kun taas Timberfinder THERMO VENT -aluskatteen lämpötilakestävyudeksi on ilmoitettu 120 °C. Useat valmistajat eivät ole ilmoittaneet lämpötilankestävyyttä. Eristeen ja aluskatteen valintaan pitää simulointien perusteella kiinnittää huomiota vesikatossa.

Piipun korkeudella pystytään vaikuttamaan, mitä eristystä tulisi käyttää vesikatossa. Simulointitulosten perusteella lyhyemmällä hormilla tulisi käyttää palovillaa eristeenä, pidemmällä voidaan siirtyä muurauslaastiin, koska lämpötilat laskevat riittävästi. Eristemateriaalin valinnassa tulisi huomioida aluskatteen lämpötilankestävyys ja hormin korkeus.

Olosuhteiden muuttamisella pintalämpötilojen osalta ei ollut kovin suurta vaikutusta yläpohjassa vallitseviin lämpötiloihin. Vaikutus näkyy selvästi vesikatossa, jossa eristepaksuus on pieni ja eristemateriaali huonompi. Tilanne on kuitenkin vain teoreettinen ja simuloinnitkin tehtiin vain mielenkiinnon vuoksi. Kattorakenteista tarvittaisiin sensoridataa, jonka perusteella vallitsevat lämpötilat valittaisiin. Vesikatosta kannattaisi tehdä myös polttotestejä.

Opinnäytetyötä tehdessä ongelmaksi osoittautui se, että materiaalien valmistajat eivät ole ilmoittaneet kaikkia materiaaliominaisuuksia. Materiaalipinnoilla, jossa lämpötilat nousevat korkeiksi, pitäisi materiaaliin asettaa lämpötilan mukaan muuttuvaa lämmönjohtavuuden arvo. Ongelmaksi osoittautui myös vertailumateriaalin puute. Vastaavia simulointeja on nähtävillä julkisesti erittäin niukasti.

Olisi hyvä, jos savuhormeista tehtäisiin enemmän simulaatioita. Simuloimalla rakenteita voi tarkastella lämpöteknisesti jo suunnitteluvaiheessa. Polttotestejä kuitenkin kannattaa tehdä jatkossakin simuloitien lisäksi, koska simuloinnissa inhimilliset virheet ovat mahdollisia.

LÄHTEET

1. Siikanen, Unto 2014. Rakennusfysiikka. Perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
2. Björkholtz, Dick 1997. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy.
3. Ympäristöministeriön asetus savupiippujen rakenteista ja paloturvallisuudesta. 2017. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170745>. Hakupäivä 13.4.2020.
4. SFS-EN ISO 6946. 2017. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods (ISO 6946:2017). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
5. SFS-EN 13216-1. 2004. Chimneys. Test methods for system chimneys. Part 1: General test methods. Helsinki: Suomenstandardisoimisliitto SFS.
6. RIL 245-2020. 2020. Pienet savupiiput. Suunnittelu-, rakentamis- ja huolto-ohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.
7. Savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus - esimerkkejä savupiippujen ja tulisijojen toteuttamisesta. 2019. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/31.1.19-Savupiippujen-rakenteet-ja-paloturvallisuus-DA5AEA7C_A3CC_4A0B_B11E_9F0971C991A1-143625.pdf/590d95d1-4787-f92f-a681-c13dbed6e5df/31.1.19-Savupiippujen-rakenteet-ja-paloturvallisuus-DA5AEA7C_A3CC_4A0B_B11E_9F0971C991A1-143625.pdf?t=1603260628143. Hakupäivä 20.5.2020.
8. Pienten savupiippujen rakenteet ja paloturvallisuus: määräykset ja ohjeet. 2007. Helsinki: Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/30497-RakMk_E3_2007_FI.pdf. Hakupäivä 20.4.2020.
9. Comsol. Saatavissa: <https://www.comsol.com>. Hakupäivä 25.11.2020.