



Heidi Jaakkonen

IKKUNOIDEN LÄMPÖHÄVIÖT JA VUODEN 2012 ENERGIA- MÄÄRÄYKSET

IKKUNOIDEN LÄMPÖHÄVIÖT JA VUODEN 2012 ENERGIA- MÄÄRÄYKSET

Heidi Jaakkonen
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, talonrakennustekniikka

Tekijä: Heidi Jaakkonen

Opinnäytetyön nimi: Ikkunoiden lämpöhäviöt ja vuoden 2012 energiamääräykset

Työn ohjaaja(t): Kimmo Illikainen

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2012 Sivumäärä: 50 + 3 liitettä

Suomen rakentamismääräyskokoelma uudistuu osittain heinäkuussa 2012, mikä kiristää määräyksiä entisestään ja tuo tullessaan muutoksia laskennassa. Määräysten kiristytessä myös ikkunoihin ja niiden kylmäsiltoihin täytyy kiinnittää entistä enemmän huomiota. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sitä, mikä on ikkunoiden paras sijoittelu seinärakenteessa, mikä on paras ikkunatyyppe ja miten ikkunoiden lämpöhäviöt voitaisiin minimoida. Lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin muutoksia kiristyneissä rakentamismääräyksissä. Työ tehtiin IEEB-projektille, joka tutkii energiatehokkuuden parantamista matalaenergia- ja passiivitaloissa.

Työssä mallinnettiin erityyppisiä ikkunoita ja niiden asennustapoja Comsol multiphysics -tietokoneohjelmalla. Saatuja tuloksia vertailtiin keskenään ja koetettiin sitä kautta löytää paras ikkunaratkaisu. Työssä tutustuttiin myös uusien rakentamismääräysten luonnosversioihin, sekä tutkittiin ikkunoita ja kylmäsiltoja koskevia materiaaleja.

Kun tarkasteltiin lämpövirtoja ikkunan sisäpinnassa, voitiin todeta, että ikkunan paras sijoituspaikka seinärakenteessa on eristeen kohdalla. Parhaaksi ikkunatyypiksi tulosten perusteella saatiin MSE-ikkuna, jolla lämpövirta ikkunan pinnassa oli noin puolet pienempi kuin MEK-ikkunalla ja lasielementillä. Ikkunan materiaalivalinnoilla ei ollut MSE-ikkunaan yhtä suurta vaikutusta kuin MEK-ikkunaan ja lasielementtiin, joihin pelkillä materiaalivalinnoilla voitiin vaikuttaa huomattavasti. Lämpöhäviöitä todettiin voitavan vähentää valitsemalla mahdollisimman vähän lämpöäjohtavia materiaaleja, kuten TPS-lista alumiinilistan sijasta. Voidaankin todeta, että mikäli halutaan rakentaa myös ikkunoiden osalta energiatehokas rakennus, kannattaa ikkunoiden valinta, sijoittaminen ja pienimmätkin detaljit suunnitella ja tarkastella huolella, koska näin voidaan saada isoakin energiansäästöjä aikaan.

Asiasanat:

Energiamääräykset 2012, Energiatehokkuus, Rakennusfysiikka, Kylmäsilto

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, House Building

Author: Heidi Jaakkonen

Title of thesis: Heat Losses of Windows and Energy Efficiency Regulations
2012

Supervisor: Kimmo Illikainen

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2012

Pages: 50 + 3 appendices

The Ministry of the Environment released the preliminary versions of the new building regulations concerning energy efficiency in 2011. The regulations will be valid starting from 1st of July 2012 and will further tighten the current requirements of energy efficiency. These new regulations affect heat loss calculations and that is why the aim of this thesis was to study how thermal bridges of windows affect heat loss. The main goal of the study was to find the best place for a window in a wall structure and to find out ways to minimize the heat losses of windows. The thesis was made for IEEB-project which studies ways to plan and build more energy efficient buildings.

Three different types of windows were modeled to 2-dimensional images by using Comsol Multiphysics software. The software calculated the heat flux of the window structures and after that the best place for a window was tried to be found by comparing the results given by the software. Also the new building regulations and a released material concerning windows and thermal bridges were examined

The studies showed that the best solution was to place the window on the same level with the heat insulation when examined in terms of heat flux and heat convection. The study results indicate that the best window type was MSE-window, which had about 50 % smaller heat flux than MEK-window and glass element. According to these studies to minimize the heat losses of the windows, the materials used in the windows has to have as little thermal density as possibly. That is why for example the thermoplastic spacer is better than aluminum spacer. These studies showed that when building energy efficient buildings it is good to spend time on choosing the windows, finding a best way to place them on the wall structure and think through all the details when placing them because that is what makes the difference.

Keywords:

Energy efficiency regulations 2012, Thermal bridges, Heat loss calculation

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	9
2 KIRISTYVÄT ENERGIAMÄÄRÄYKSET	11
2.1 D3 rakennuksen energiatehokkuus	13
2.2 C4 lämmöneristys	14
2.3 D5 rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta	14
2.4 E-luku	15
3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN IKKUNARAKENTEESSA	17
3.1 Lämmön siirtymismuodot	17
3.2 Ikkunarakenne	18
3.2.1 Ikkunan ominaisuuksia	19
3.2.2 Ikkunoiden energialuokitus	22
4 KYLMÄSILLAT JA LÄMMÖNLÄPÄISYKERROIN	23
4.1 Ikkunoiden sijoittelu ilmansuunnittain	23
4.2 Lämmönläpäisykerroin eli u-arvo	24
4.3 Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt	26
5 IKKUNOIDEN MALLINTAMINEN COMSOL MULTIPHYSICS -OHJELMALLA	29
5.1 Mallinnusohjelman valinta	36
5.2 Mallintaminen	37
6 IKKUNALIITTYMIEN LÄMPÖVIR RAT	40
6.1 Lämpövirrat MSE-ikkunassa	40
6.2 Lämpövirrat MEK-ikkunassa	43
6.3 Lämpövirrat lasielementissä	45
6.4 Lämpövirtojen erot ikkunoiden välillä	47
7 YHTEENVETO	50
LÄHTEET	51

LIITTEET

Liite 1 Comsol multiphysics -tulokset MSE-ikkunarakenteelle

Liite 2 Comsol multiphysics -tulokset MEK-ikkunarakenteelle

Liite 3 Comsol multiphysics -tulokset ikkunaelementtirakenteelle

SANASTO

Ilmanvuotoluku (q_{50}) [$m^3/(h \cdot m^3)$]

tarkoittaa rakennusvaipan keskimääräistä vuotoilmavirtaa tunnissa 50 Pa:n paine-erolla kokonaissämittojen mukaan laskettua rakennusvaipan pinta-alaa kohden.

Kylmäsilta

on rakennusosassa oleva, hyvin lämpöä johtavasta materiaalista valmistettu rakenneosaa. Kylmäsilat jaetaan tavallisesti viivamaisiin ja pistemäisiin kylmäsiltoihin.

Lämmönjohtavuus (λ) [$W/(m \cdot K)$]

tarkoittaa lämpövirran tiheyttä jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen.

Lämmönläpäisykerroin (U) [$W/(m^2 \cdot K)$]

tarkoittaa lämpövirran tiheyttä, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen.

Lämmönvastus (R) [$(m^2 \cdot K)/W$]

tarkoittaa termisessä jatkuvuustilassa olevan tasapaksun ainekerroksen tai kerroksellisen rakenteen lämmönvastusta, joka ilmoittaa rakenteen eri puolilla olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen.

MEK on lyhenne ja tarkoittaa kiinteää ikkunaa, jossa on 2 - 3 lasia ja niiden välitilassa lämpöä eristävä kaasu.

MSE on lyhenne ja tarkoittaa sisäänaukeavaa kaksipuitteista ikkunaa, jossa on kolme lasia.

Rakennuksen kokonaisenergiankulutus (E-luku) [kWh/m²]

tarkoittaa energiamuotojen kertoimilla painotettua rakennuksen vuotuista ostoenergian laskennallista kulu-
tusta D3-määräyksissä annetuilla säännöillä ja lähtöar-
voilla laskettuna lämmitettyä nettoalaa kohden.

Rakennuksen vaippa tarkoittaa niitä rakennusosia, jotka erottavat lämpimän, puolilämpimän, erityisen lämpimän tai jäähdytettävän kylmän tilan ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämät-
tömästä tilasta.

1 JOHDANTO

Määräysten kiristyessä ja mentäessä kohti nollaenergiataloja on ikkunoiden ja niiden kylmäsiltojen rooli energiatarkastelussa korostunut. Koska ikkunoilla on suuri merkitys vaipan lämpöhäviöille, niitä on syytä tarkastella lähemmin. Matalaenergiaratkaisut rakentamisessa eivät ole enää merkittävästi kalliimpia verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. Matalaenergiatalon lisäkustannuksiksi on arvioitu 3 - 5 % ja VTT:n arvion mukaan passiivitalon lisäkustannukset ovat 5 - 10 %:n luokkaa. Lisäkustannukset saadaan kuitenkin takaisin matalampina asuinkustannuksina sekä yksinkertaisemman lämmitysjärjestelmän muodossa. (1.)

Myös kiristyneet määräykset ovat pakottaneet rakentajat siirtymään kohti passiivi- ja nollaenergiataloja. Rakentamismääräykset kiristyivät edellisen kerran 2010 ja ovat kiristymässä taas tänä vuonna. Aikaisemmin kiristettiin 30 % ja heinäkuussa voimaantulevien määräysten kaavailtu kiristys on noin 20 % edellisten 2010 kiristyneiden rakennusmääräysten vaatimaan energiatehokkuuteen verrattuna. Suurella todennäköisyydellä määräykset kiristyvät vielä ennen vuotta 2020, koska vuoden 2020 energiatehokkuusdirektiivi esittää, että vuodesta 2020 eteenpäin tulisi rakennusten olla lähes nollaenergiataloja. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että rakennus tuottaa yhtä paljon energiaa, mitä se kuluttaa. (1; 2,s. 4.)

Ikkunoilla on suuri merkitys myös asumisviihtyvyyden kannalta, koska varsinkin vanhoissa ikkunoissa vedontunne ja pintalämpötilat vaikuttavat viihtyvyyteen negatiivisesti. Tämä, yhdessä energiakustannusten ja määräysten kanssa, on saanut kuluttajat kiinnittämään huomiota ikkunavalintoihin ja pakottanut ikkunavalmistajat kehittämään yhä energiatehokkaampia ratkaisuja.

Tärkein tehtävä tässä opinnäytetyössä on selvittää, kuinka suuri vaikutus ikkunan valinnalla ja sijoittamisella seinärakenteeseen on lämpöhäviöiden syntymiseen. Lisäksi tavoitteena on selvittää, miten ikkunoiden lämpöhäviöitä voitaisiin vähentää. Opinnäytetyössä tarkastellaan myös muutoksia kiristyneissä raken-

tamismääräyksissä, pääpainona määräysten tarkastelussa ovat kylmäsiltojen laskennassa tapahtuvissa muutoksissa.

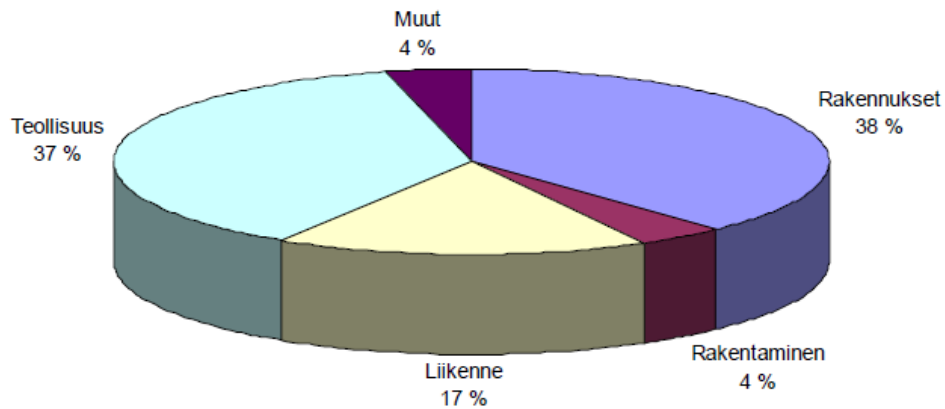
Opinnäytetyö tehdään IEEB-projektille, joka tutkii energiatehokkuuden parantamista matalaenergia- ja passiivitaloissa. Projektissa ovat mukana Oulun seudun ammattikorkeakoulun lisäksi Lulajan tekninen yliopisto, Uumajan yliopisto, Oulun kaupunki, Norut Narvik, Betong & Entreprenörssenteret, Norcem AS, PRT, NCC Rakennus Oy, SRV Kiinteistöt Oy, Lappi Talot Oy, Kastelli Talot Oy, Kannustalo Oy, Kontiotuote Oy, Puutuomela Oy. Ikkunadetaljit saatiin Domus yhtiöt Oy:ltä.

2 KIRISTYVÄT ENERGIAMÄÄRÄYKSET

Suomen ympäristöministeriö on laatinut rakentamista koskevat määräykset Suomen rakentamismääräyskokoelmaksi. Se koostuu kahdeksasta osaluokasta, jotka kaikki sisältävät useampia osia. Niissä määritellään muun muassa ohjeita eristämiseen, LVI-tekniikkaan, energiatalouteen ja paloturvallisuuteen. Suomen rakentamismääräyskokoelman tavoitteena on edistää kestävää ja ekologista rakentamista sekä varmistaa rakentamisen hyvä laatu. Se koskee lähinnä uudisrakentamista, mutta korjaus- ja muutostöissä määräyksiä voidaan soveltaa, mikäli määräyksissä ei toisin sanota. (3.)

Suomi on sitoutunut vähentämään päästöjä ja parantamaan energiatehokkuutta eri sopimusten nojalla. Kioton ilmastopöytäkirjan nojalla Suomen tulisi vähentää päästöjä vuoteen 2050 mennessä 80 % vuoden 1990 tasosta. Lisäksi Suomi sitoo EU:n ilmasto- ja energiapolitiikka, jonka tavoitteina ovat kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 %:lla, uusiutuvien energianlähteiden osuuden nostaminen 20 %:iin energian loppukulutuksesta ja energiatehokkuuden parantaminen 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä. (2, s. 4; 4, s.146.)

Koska rakennusten energiatehokkuuden parantaminen ei ole edennyt tarpeeksi nopeasti, halutaan sitä nyt ohjata kiristämällä määräyksiä. Rakennusten energiankulutus vastaa noin 40 % koko maan energiankulutuksesta (kuva 1) ja onkin olennaisessa osassa päästövähennyksiä tehtäessä. Rakennusten energiatehokkuuden parantamisella on iso vaikutus päästöjen vähenemiseen. Tästä syystä määräyksiä kiristetään niin, että rakentamista ohjataan kohti nollaenergiarakentamista. Kiristyksillä pyritään myös hyvään ja kustannustehokkaaseen rakentamiseen, mikä vaatii hyvää suunnittelua. Tämä taas asettaa suuremmat paineet valvonnalle, jotta suunniteltuihin arvoihin päästäisiin. (5, s.18.)



KUVA 1. Rakennusten energiankulutus (2, s. 5)

Suomen rakentamismääräyskokoelma uudistuu koko ajan rakentamisen kehityksessä. Tämän opinnäytetyön kannalta oleellimmat muutokset ovat tapahtumassa kokoelman osissa C ja D, jotka käsittelevät energiamääräyksiä ja näistä erityisesti määräysten osat C4, D3 ja D5, joista kaikki ovat uudistumassa vuoden 2012 aikana. C4 käsittelee lämmöneristystä, D3 rakennusten energiatehokkuuden määräyksiä ja ohjeita ja D5 rakennuksen energiankulutusta ja lämmitystehontarpeen laskentaa. (3.)

Oleellimmat muutokset tapahtuvat laskennassa. Niistä on tehty monipuolisempia, mikä tekee laskennasta myös vaikeampaa. Monipuolistamisen tavoitteena on saada nollaenergialaskennan vaatimat avoimet laskentamenetelmät tutuiksi. Uusissa määräyksissä on siirrytty niin sanottuun kokonaisenergiatarkasteluun, mikä tarkoittaa, että huomioidaan rakennuksen kokonaisenergiankulutus entisten yksittäisten osien kulutuksen sijaan. Tämä vapauttaa suunnittelun mahdollisuutta uusiin erilaisempiin ratkaisuihin ja kannustaa kehitykseen. Koska laskennan mallintaminen on vapaampaa, voidaan energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät huomioida tarkemmin. Uudistuksen myötä myös kylmäsiltojen vaikutus huomioidaan tarkemmin ja niiden vaikutus onkin oleellinen u-arvojen pienentyessä. (6, s. 1.)

Energiatehokkaantalon rakentaminen vaatii saumatonta yhteistyötä eri tahojen välillä. Yksittäisten osien energiankulutuksen sijaan tarkastellaankin kokonaisuuden energiankulutusta. Talon energiantarpeeseen vaikuttavat muun muassa lämmityksen ja viilennyksen tarve sekä käyttövesi ja sähkönkulutus. Kun taloista tehdään hyvin lämpöä eristäviä, tulisi huolehtia siitä, ettei viilennyksen tarve nouse kohtuuttomasti. Tähän voidaan vaikuttaa muun muassa varjostavilla rakenteilla, ikkunan suuntauksilla ja erilaisilla ikkunaominaisuuksilla. Myös lämpöhäviöillä on osansa rakennuksen energiatehokkuudessa. Helposti lämpöhäviöitä aiheuttavat rakenteet, kuten esimerkiksi ikkunaliittymät, on hyvä suunnitella tarkkaan ja kiinnittää erityistä huomiota toteutukseen rakennusvaiheessa. (2, s. 44.)

2.1 D3 rakennuksen energiatehokkuus

1.7.2012 tulevat voimaan uudet määräykset rakennusten energiatehokkuudesta rakentamismääräyskokoelman osassa D3. Kyseiseen kokoelman osaan on nyt kerätty kaikki energiatehokkuuden vaatimukset, myös osista C3 ja D2. Kokoelman osaa C3 on esitetty kokonaan kumottavaksi. Uusittu osa D3 koskee vain uudisrakentamista ja siinä energiankulutusta tarkastellaan kokonaisvaltaisemmin kuin aikaisemmin. Uusitun määräyksen on tarkoitus antaa mahdollisuudet uusien ratkaisujen käyttämiseen rakentamisessa sekä ohjata rakentamista yleiseuroopalaiseen suuntaan. (2, s.18.)

Uutta uudessa D3:ssa on E-luvun laskuohjeiden lisäksi se, että q_{50} -luku korvaa nykyisen n_{50} -luvun. q_{50} -luku ilmoittaa ilmavuodon vaipan pinta-alaan suhteutettuna, kun n_{50} -luku ilmoittaa sen vuodon tilavuuden mukaan. Lisäksi uudessa D3:ssa rakennuksen sallituksi ilmanvuotoluvuksi annetaan $4\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Annettua maksimi arvoa pienempiä arvoja voidaan käyttää laskennassa, mikäli niiden paikkansapitävyys todistetaan mittaamalla. Taulukossa 1 näkyy määräysten kehittyminen eri rakenteille (taulukko 1). Siitä voidaan havaita, että ikkunoiden u -arvoa on parannettu vähitellen ja tulevat määräykset alittavia ikkunoita löytyykin jo runsaasti markkinoilta. (7.)

TAULUKKO 1. U-arvon kehitys eri rakennusosille D3:ssa

Rakennuksen osa	1969	1985	2003	2008	2010	2012
ulkoseinä	0,41...0,93	0,28	0,25	0,24	0,17	0,17
alapohja	0,35...0,47	0,36	0,25	0,19	0,17	0,17
yläpohja	0,35...0,47	0,22	0,16	0,15	0,09	0,9
ikkuna	2,44...3,14	2,1	1,4	1,4	1	1
ovi		0,7	1,4	1,4	1	1

2.2 C4 lämmöneristys

C4 on uudistunut edellisen kerran vuonna 2003 ja uudistuu jälleen 2012. Tärkeä ero näiden versioiden välillä on, että vuoden 2012 versiossa liittymien kylmäsil-
lat otetaan laskennassa huomioon. Uudessa C4:ssa U-arvon laskenta ja läm-
mönjohtavuuden suunniteluarvon valinta tulee yhtenäiseksi EN-standardien
kanssa. (6, s.1.)

Vanhassa C4:ssa lämmönjohtavuus laskettiin normaalisenä lämmönjohtavuute-
na (λ_n), missä otetaan huomioon lämmöneristeen epäideaalinen asennus ja
lämmöneristeen sisässä tapahtuvan ilmavirtauksen vaikutus eristykseen. Uu-
dessa C4:ssa lämmönjohtavuus lasketaan lämmönjohtavuuden suunnittelu ar-
vona (λ_u). Suunnitteluarvo ei huomioi lämmöneristeen epäideaalista asennusta,
eikä lämmöneristeen sisässä tapahtuvan ilmavirtauksen vaikutusta eristykseen,
vaan nämä huomioidaan erillisessä korjaustermissä (ΔU). (8.)

2.3 D5 rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta

Suomen rakennusmääräysten osassa D5 on tapahtunut suurimmat muutokset.
Laskenta muuttuu energiatehokkuusluvun laskennasta energialuvun lasken-
taan. E-luvulle on annettu vaatimuksia rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan
ja siinä otetaan huomioon energianmuotokertoimet. Laskentamenetelmänä käy-
tetään energiatasemenetelmää, jossa energiantarve lasketaan kuukausittain.
Saadut tulokset summaamalla saadaan vuosikulutus. (9.)

Muutoksia on tapahtunut myös muun muassa ilmanvaihdon laskennassa ja säätiedoissa, jotka on uusittu uutta laskentatapaa varten. Tämän opinnäytetyön kannalta tärkein muutos on kuitenkin tapahtunut rakennuksen johtumislämpöhäviöiden laskennassa. Uudessa D5:ssä johtumislämpöhäviöt lasketaan rakennusosa kohtaisesti, minkä jälkeen ne summataan, toisin kuin vanhassa D5:ssä, jossa laskettiin ensin rakennusosien ominaislämpöhäviöt, jotka sitten summattiin ja sijoitettiin johtumislämpöhäviön kaavaan. Toinen oleellinen muutos on se, että johtumislämpöhäviötä laskettaessa huomioidaan kylmäsillat. Kylmäsillat lasketaan kaavalla 1. Viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssille on annettu ohjearvoja, mutta ne on mahdollista myös laskea. Ohjearvot löytyvät uudesta D5:sta. (9.)

$$Q_{\text{kylmäsillat}} = \sum l_k \cdot \Psi_k \cdot (T_s - T_u) \cdot \Delta t / 1000 \quad \text{KAAVA 1}$$

$Q_{\text{kylmäsillat}}$ = johtumislämpöhäviö kylmäsillan läpi (kWh)

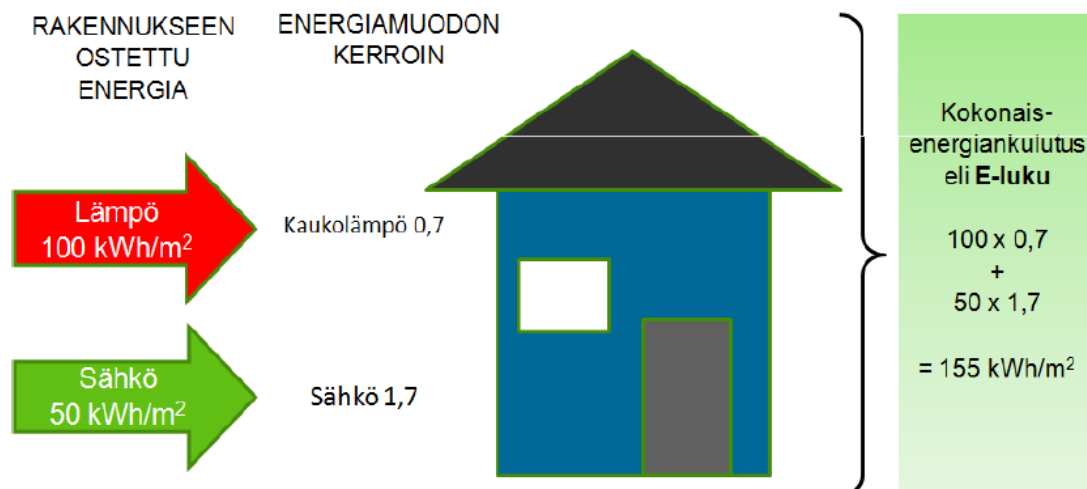
l_k = viivamaisen kylmäsillan pituus (m)

Ψ_k = viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi (W / (m·K))

2.4 E-luku

Määräysten uudistuessa käyttöön otetaan uusi rakennuksen kokonaisenergian määrittävä E-luku. Tarkemmin E-luku tarkoittaa energiamuotojen kertoimilla painotettua rakennuksen vuotuista ostoenergiankulutusta rakennustyyppin standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden. Se lasketaan summaamalla ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain. Eri energiamuotoja ovat sähkö, kaukolämpö, kaukojäähdytys, fossiiliset polttoaineet sekä rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet. Energiamuoto kertoimet löytyvät uudesta D3:sta. E-luvussa huomioidaan rakennuksen käyttämä energian tuotantomuoto, lämmitys, ilmanvaihto, kuluttajalaitteet, valaistus, lämmin vesi sekä säävyöhyke ja sen yläraja, jotka määräytyvät rakennuksen pinta-

alan mukaan. Kuvassa 2 on esimerkki kaukolämpörakennuksen E-luvun laskennasta. (7.)



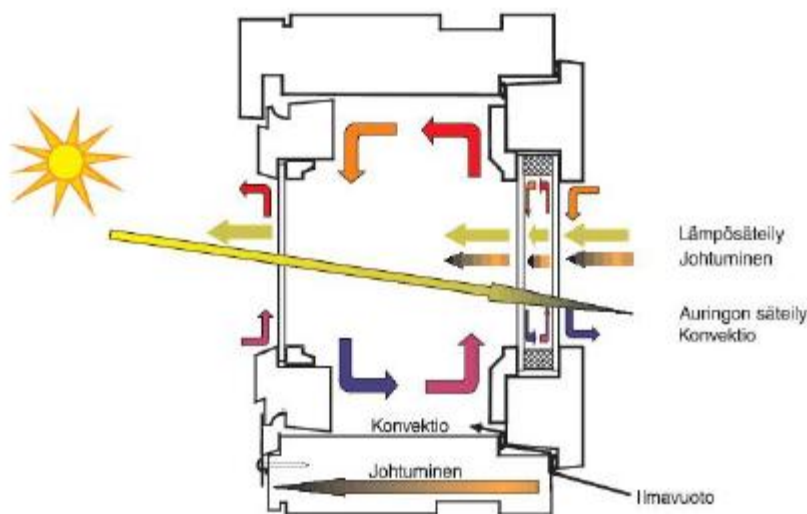
KUVA 2. E-luvun laskentaesimerkki kaukolämpötalossa (10, s. 17)

3 LÄMMÖN SIIRTYMINEN IKKUNARAKENTEESSA

3.1 Lämmön siirtymismuodot

Yleisesti ottaen lämpöä siirtyy sisältä ulos ja auringonsäteily taas luovuttaa lämpöä sisäilmaan. Ikkunarakenteessa lämmön siirtyminen voi tapahtua johtumalla, säteilemällä ja konvektiolla, lisäksi lämpöä voi karata ilmavuotona (kuva 3).

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vain johtumista. (11, s.16.)



KUVA 3. Energian kulku ikkunarakenteessa (11, s.16)

Johtumisella tarkoitetaan sitä, kun molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen. Johtumisessa lämpö pyrkii tasoittumaan johtamalla eli virtaamalla väliaineessa lämpimästä kylmempään päin. Johtuminen tapahtuu metallissa huomattavasti nopeammin kuin esimerkiksi puussa, mutta kiinteiden aineiden lisäksi johtumista tapahtuu myös nesteissä. Eri aineiden lämmöjohtavuutta kuvataan λ -arvolla, jonka yksikkö on $[W/m \cdot K]$. Se, miten nopeasti lämpö pyrkii tasoittumaan, eli rakenteessa tapahtuva lämpövirta, lasketaan kaavalla 2. (12, s.12.)

$$\Phi = dQ / dt$$

KAAVA 2

Φ = lämpövirta (W)

dQ = lämpömäärä, joka tuodaan tai poistuu systeemistä

dt = kulunut aika

Lämpövirran tiheys q lasketaan kaavalla 3 (12, s.12).

$$q = d\Phi / dA$$

KAAVA 3

q = lämpövirran tiheys (W/m^2)

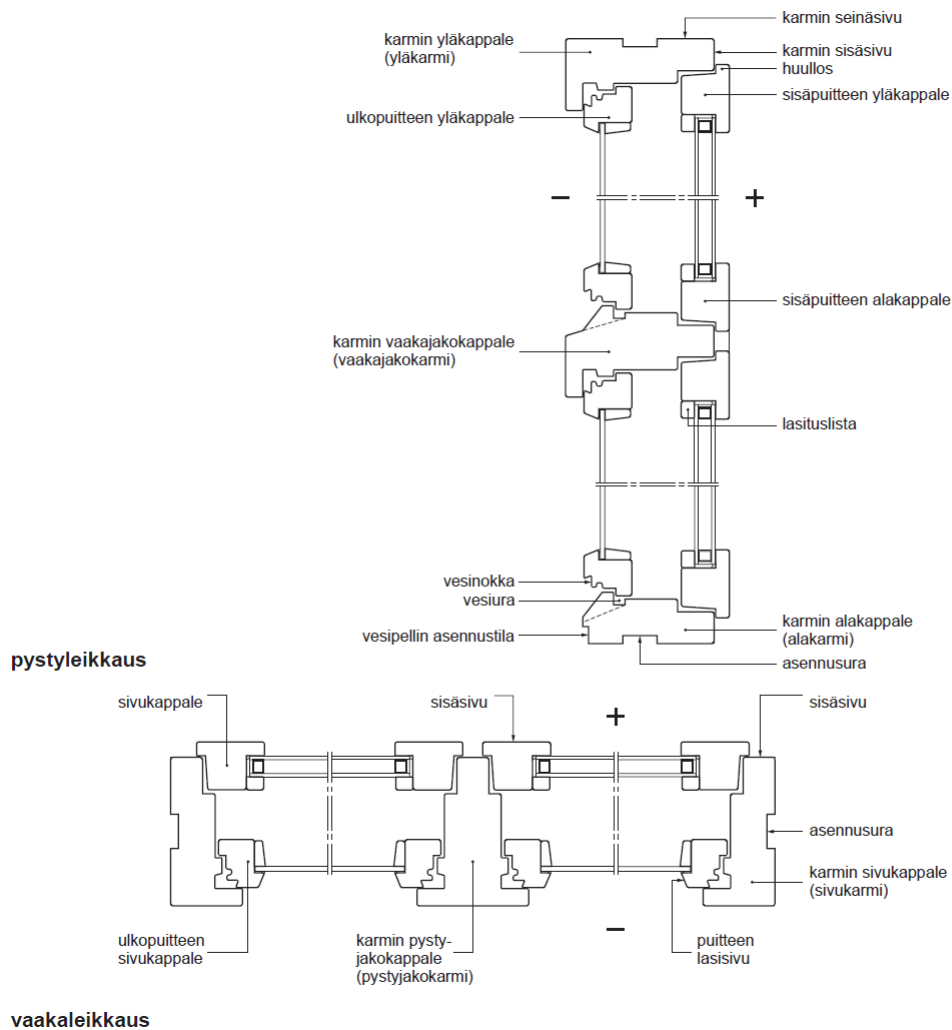
$d\Phi$ = lämpövirta

dA = pinta-ala

Lämmön siirtymisen estäminen rakenteissa on iso haaste. Ikkunan lämmöneristävyyttä voidaan parantaa parantamalla eristystä ja valitsemalla materiaalit niin, että lämmön siirtyminen olisi mahdollisimman vähäistä. Energiansäästöikkunoissa karmit ja puitteet ovat yleensä eniten lämpöä siirtävä osa, minkä vuoksi niihin kannattaakin kiinnittää erityistä huomiota. Samasta syystä kannattaa valita yksi iso ikkuna monen pienen ikkunan sijasta. (1.)

3.2 Ikkunarakenne

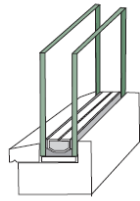
Tavallisesti ikkuna muodostuu karmista sekä kahdesta tai useammasta puitteesta, joihin kiinnittyy lasi (kuva 4). Energiansäästöikkunoissa on normaalisti 3 tai 4 lasia, selektiivikalvo ja välissä lämpöeristävää kaasua. (13, s.6 – 8.)



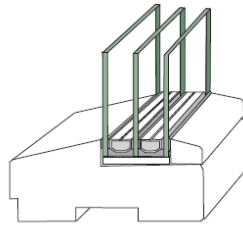
KUVA 4. Ikkunaosien nimityksiä (14, s.4.)

3.2.1 Ikkunan ominaisuuksia

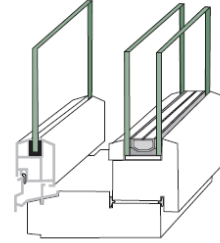
Lasin lämmönjohtavuus eli λ -arvo on 1,0 W/mK. Valoaukon eli ikkunan läpinäkyvän osan lämmönjohtavuutta voidaan parantaa erityislasirakenteella, joka koostuu yleensä selektiivikalvosta, täytekaasusta ja välilistasta. Laseja rakenteessa voi olla kaksi tai kolme (kuva 5).



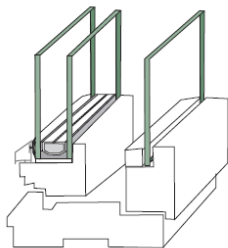
2-lasinen eristyslasi (2K). Eristyslasiä käytetään ikkunoissa, ovissa, julkisivuissa ja lasikatoissa. Lämmöneristävyys heikkenee merkittävästi pakkasella ja tuulisella säällä



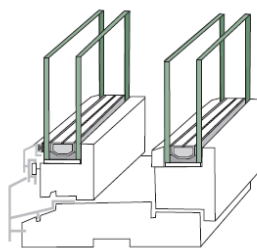
3-lasinen eristyslasi (3K) käytetään ikkunoissa, ovissa, julkisivuissa ja jonkin verran lasikatoissa. Suositellaan kiinteään lasitukseen. U-arvo ei ole herkkä sään muutoksille



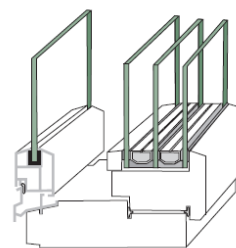
1+2K-lasirakennetta käytetään ikkunoissa ja ovissa. Yksinkertainen lasi on ulkopuitteessa (MSE-ikkuna)



2K+1-lasirakenne, jossa eristyslasi on ulompana. Tätä rakennetta käytetään joissakin tapauksissa ikkunoiden ja kytkettyjä puitteita sisältävien ovien korjauksen yhteydessä (MSE-ikkuna)



2K + 2K -lasirakenne. Ulko- ja sisäpuitteissa on eristyslasi



1 + 3K -lasirakenne, jonka sisäpuitteessa on 3-lasinen eristyslasi (3K)

KUVA 5. Ikkunarakenteita, joissa on erikoislasirakenne (13, s.3)

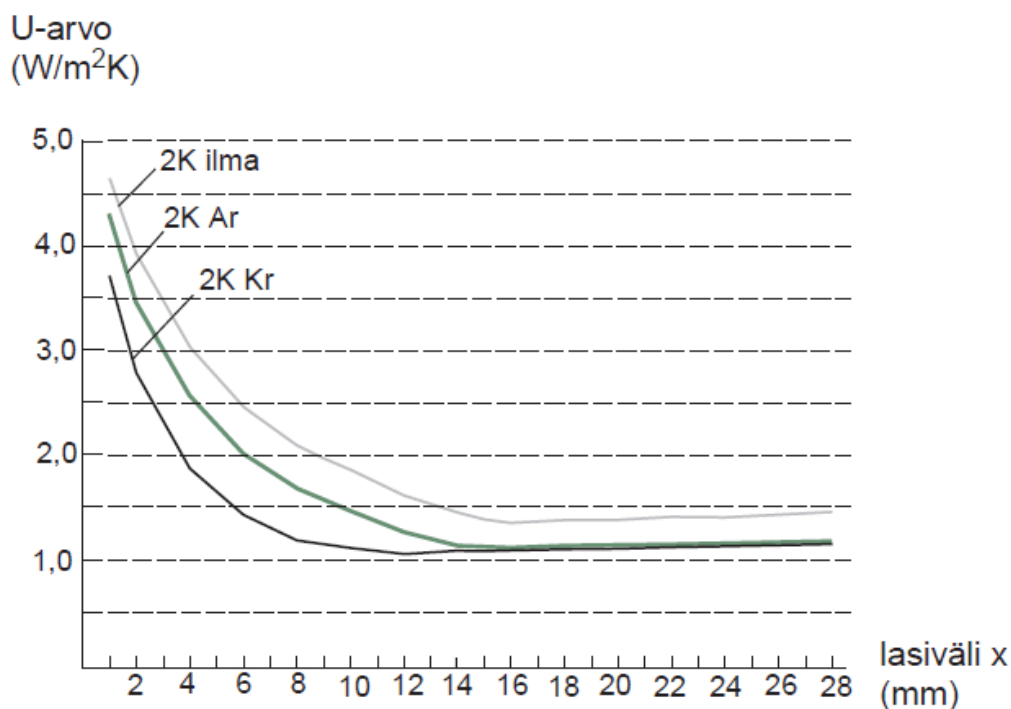
Selektiivikalvo on lasin pinnassa lasin emissiivisyyttä pienentävä metallioksidikerros, joka päästää vain osan sisältäpäin heijastuvasta, pitkäaaltoisesta lämpösäteilystä läpi. (13, s.8.)

Merkittävä osa valoaukon lämmöneristävyttä on myös ikkunan välissä käytetty täytekaasu. Käytettyjä kaasuja ovat ilma, argon, krypton ja ksenon. Käytännössä kuitenkin argon on yleisimmin käytetty täytekaasu, koska se on lämmöneristävydeltään parempi kuin ilma, mutta hinnaltaan edullisempi kuin krypton ja ksenon. (13, s.8.)

Välilistamateriaalina käytetään muun muassa alumiinia ja ruostumatonta terästä sekä muovi- ja komposiittivälilistoja. Yleisimpiä välilistojen leveyksiä alumiinille ovat 9, 12, 15 ja 18 mm ja muille 8, 10, 12 ja 16 mm. Alumiini on yleisin lista-

tyyppi, mutta sillä on myös huonoin lämmöneristyskyky, minkä takia esimerkiksi TPS- eli lämpömassalista on yleistymässä. (13, s.8.)

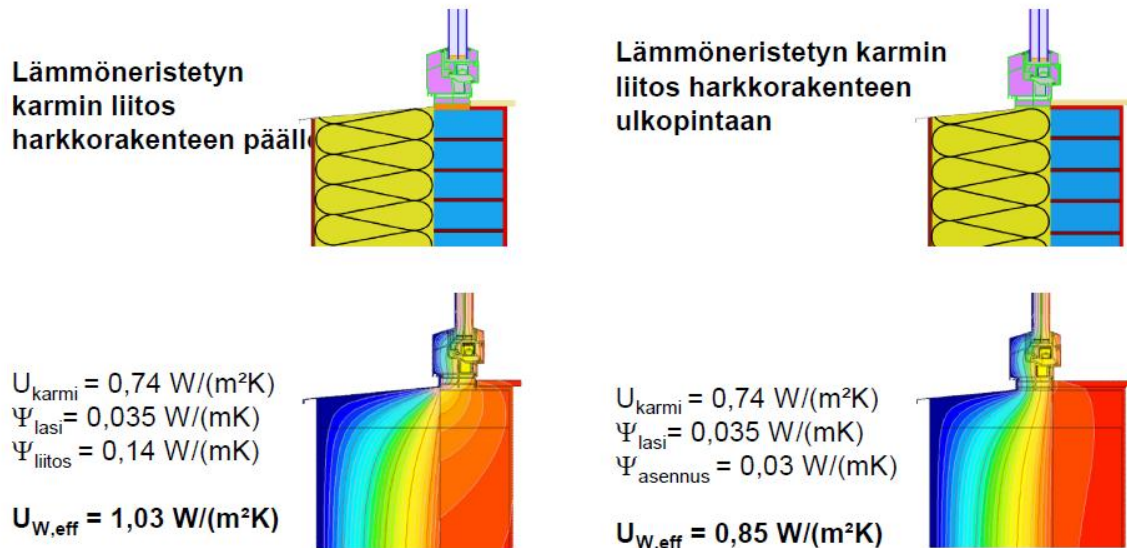
Myös lasien etäisyys toisistaan rakenteessa vaikuttaa rakenteen u-arvoon. Optimivälin valintaan vaikuttaa valittu kaasus, mikä taas vaikuttaa valittavaan listaleveyteen. Kuvassa 6 näkyy 2K-eristyslasin 2K(4-x-e4) lasivälin vaikutus U-arvoon. Eristyslasin huonetilan puoleinen lasi on energiansäästölasia, jonka emissiviteetti on 0,03. Optimi lasivälit ovat ilmalla 16 mm, argonilla 15 mm ja kryptonilla 10 mm. (13, s.8.)



KUVA 6. Esimerkki lasivälin vaikutuksesta U-arvoon (13, s.8)

Ikkunan kehällä tarkoitetaan ikkunan avautumatonta karmirakennetta ja karmirakenteeseen saranoin liitettyjä avautuvia puiteosia. Avautumattomasta ikkunasta puuttuu yleensä puiteosa, jolloin lasitus kiinnitetään suoraan karmirakenteeseen. Ikkunan kehä on yleensä ikkunarakenteen parhaiten lämpöjohtava osa ja siksi sen parantamiseen tulee kiinnittää suurin huomio ikkunoiden energiatehokkuutta parannettaessa. (12, s.36.)

Myös ikkunan sijoittamisella seinärakenteeseen nähden näyttäisi olevan vaikutus rakenteen u-arvoon. VTT:n tutkimuksen mukaan sillä, onko lämmöneristetyin karmin liitos sijoitettu harkkorakenteisessa seinässä harkon päälle vai harkkorakenteen ulkopintaan voidaan todeta olevan eroa (kuva 7). (15, s.13.)



KUVA 7. Karmin liitoksen sijoittelun aiheuttamat erot (15, s.13)

3.2.2 Ikkunoiden energialuokitus

Ikkunoiden energialuokitus on suunniteltu kuluttajien tueksi ikkunoita valittaessa. Se on vapaaehtoinen ikkunavalmistajille. Siinä ikkunat luokitellaan ikkunoiden energiatehokkuuden mukaan asteikolla a:sta g:hen. Luokituksessa ikkunoille laskettava vertailuluku kertoo, paljonko ikkunarakenne aiheuttaa lämmitystarvetta vuodessa. Ikkunoiden energialuokitusta ovat olleet kehittämässä muun muassa VTT ja Motiva Oy. (16.)

4 KYLMÄSILLAT JA LÄMMÖNLÄPÄISYKERROIN

Kylmäsilillä tarkoitetaan rakennusosassa olevaa, hyvin lämpöjohtavasta materiaalista valmistettua rakenneosaa. Kylmäsilin kohdalla lämpötilaero aiheuttaa sen, että lämpö pyrkii karkaamaan sitä pitkin ulospäin tehokkaammin kuin muussa rakenteessa. Kylmäsilat jaetaan pääsääntöisesti kahteen tyyppiin; pistemäisiin ja viivamaisiin kylmäsiltoihin. Pistemäisellä kylmäsilillä tarkoitetaan rakenteessa paikallisesti esiintyvää kylmäsiltaa, jolla ei ole rakenteen pinnan suunnassa pysyvää poikkileikkausta, kun taas viivamaisella kylmäsilillä poikkileikkaus on jatkuva ja se pysyy samana pinnan suunnassa. Lisäksi luokittelu voidaan tehdä säännöllisiin ja epäsäännöllisiin kylmäsiltoihin. Säännöllisiä kylmäsiltoja ovat esimerkiksi vaipassa sijaitsevat ruonkorakenteet ja epäsäännöllisiä rakennusosien liitosten väliset liittymät, kuten ikkunaliittymät. (8, s.4 - 5.)

Kylmäsilin kohdalla lämpötila on poikkeava ympäröivään lämpötilaan nähden, mikä voi aiheuttaa vedontunnetta ja pahimmillaan kosteuden kerääntymistä rakenteeseen. Kylmäsiltojen aiheuttamat ongelmat voidaan välttää hyvällä suunnittelulla, mutta mikäli niitä pääsee syntymään, tulee niiden vaikutus minimoida esimerkiksi eristämällä. Koska ikkunoissa on helpoin heikentää kylmäsiltojen vaikutusta parantamalla karmien ominaisuuksia, tässä opinnäytetyössä tutkitaan, olisiko karmiton ikkunaelementti parempi ratkaisu perinteiseen karmilliseen ikkunaan verrattuna. (12, s.23.)

4.1 Ikkunoiden sijoittelu ilmansuunnittain

Ikkunoiden suuntaamisella ilmansuunnittain on merkitystä talon energiatehokkuuden kannalta. Pääsääntönä pidetään sitä, että suuret ikkunapinnat, kuten olohuoneen ikkunat, suunnataan etelään, jolloin auringon lämmittävä vaikutus hyödynnetään ja luonnon valoa saadaan myös talvella. Liialta lämmöltä suojaavat muun muassa räystäsrakenteet ja sälekaihtimet. Pienet ikkunapinnat suunnataan pohjoiseen, jolloin mahdollisimman vähän lämpöä luovutetaan ulospäin. (1;16.)

Hyvät ja energiatehokkaat ikkunat helpottavat suunnittelua. Kun ikkunapinnat pysyvät kylmilläkin ilmoilla lämpiminä, ikkunoiden suuntaamisella ei ole niin suurta merkitystä kuin aiemmin. Kesäisin liiallista lämpeämistä vastaan on saatavilla muun muassa auringonsuojalaseja, joiden ansiosta viilentämisen tarve pienenee. (1;16.)

4.2 Lämmönläpäisykerroin eli u-arvo

Lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla 4. Se on käänteisluku rakennuksen kokonaislämmönvastukselle R_T , joka sisältää rakennusosan lämmönvastuksen ja rakennusosan molempien puolien pintavastukset. (8, s.6 - 10.)

$$U = 1 / R_T \quad \text{KAAVA 4}$$

U = rakennusosan lämmönläpäisykerroin ($W/(m^2 \cdot K)$)

R_T = rakennusosan kokonaislämmönvastus ($m^2 \cdot K/W$)

Rakennusosan kokonaislämmönvastus saadaan kaavaa 5 käyttäen.

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_g + R_b + R_{q1} + R_{q2} + \dots + R_{se} \quad \text{KAAVA 5}$$

R_{si} = rakenteen sisäpuolinen pintavastus

R_{se} = rakenteen ulkopuolinen pintavastus

Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus valitaan taulukosta 2. Vastus riippuu lämpövirran suunnasta.

TAULUKKO 2. Rakennusosan sisä- ja ulkopuolen pintavastukset (8, s.22)

Pintavastus $m^2 \cdot K/W$	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
sisäpuolen pintavastus (R_{si})	0,10	0,13	0,17
ulkopuolen pintavastus (R_{se})	0,04	0,04	0,04

Yksittäisen ainekerroksen lämmönvastus saadaan kaavasta 6.

$$R = d / \lambda_U$$

KAAVA 6

d = ainekerroksen paksuus (m)

λ_U = ainekerroksen lämmönjohtavuuden suunnitteluarvo

Mikäli rinnakkaiset ainekerrokset ovat lämmönjohtavuudeltaan erilaisia lämpövirran suunnassa, täytyy rakennuksen kokonaislämmönvastukselle laskea ylä- ja alalikiarvo, joiden keskiarvo on kokonaislämmönvastus. Ylälikiarvo lasketaan kaavalla 7. (8, s.8 – 9.)

$$1/R_T' = f_a / R_{Ta} + f_b / R_{Tb} + \dots + f_n / R_{Tn}$$

KAAVA 7

R_T' = rakennusosan kokonaislämmönvastuksen ylälikiarvo (m^2K/W)

f_a, f_b, \dots, f_n = lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{Ta}, R_{Tb}, \dots, R_{Tn}$ = lohkojen a,b, ..., n kokonaislämmönvastukset (m^2K/W)

Alalikiarvo lasketaan epätasa-aineisia ainekerroksia sisältävälle rakennusosalle kaavalla 8. (8, s.8 - 9)

$$1/R_j' = f_a / R_{ja} + f_b / R_{jb} + \dots + f_n / R_{jn}$$

KAAVA 8

R_j' = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n yhteen laskettu lämmönvastus (m^2K/W)

f_a, f_b, \dots, f_n = yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a, b, ..., n osuudet rakennusosan lämpövirran suuntaan nähden kohtisuorasta pinta-alasta

$R_{ja}, R_{jb}, \dots, R_{jn}$ = rakennusosan kerroksessa j yhdistettävien rinnakkaisten lohkojen a,b, ..., n kokonaislämmönvastukset (m^2K/W)

Kaavoilla 7 ja 8 laskettujen arvojen keskiarvosta saadaan rakennusosan kokonaislämmönvastus. Korjattu lämmönläpäisykerroin saadaan lisäämällä kaavalla

4 laskettuun arvoon lämmönläpäisykertoimen korjaustermi ΔU , joka lasketaan kaavalla 9. (8, s.10.)

$$\Delta U = \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r \quad \text{KAAVA 9}$$

ΔU = lämmönläpäisykertoimen korjaustermi ($W/(m^2 \cdot K)$)

ΔU_f = mekaanisista kiinnikkeistä aiheutuva korjaustekijä ($W/(m^2 \cdot K)$)

ΔU_g = ilmaraoista aiheutuva korjaustekijä ($W/(m^2 \cdot K)$)

ΔU_r = käännyistä katoista aiheutuva korjaustekijä ($W/(m^2 \cdot K)$).

4.3 Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt

Vanhassa D5:ssa rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt laskettiin siten, että ensin laskettiin rakennusosakohtaiset ominaislämpöhäviöt, minkä jälkeen ne summatiin rakennusosien yhteenlasketuksi ominaislämpöhäviöksi ΣH_{joht} ja saatu tulos sijoitettiin rakenteiden läpijohtuvan energian laskentakaavaan. Kyseisessä laskentamenetelmässä otettiin huomiin ulkoseinät, alapohja, yläpohja, ikkunat ja ovet, kun taas uuden D5:n laskentaohjeissa näiden lisäksi rakenteiden läpijohtuvan energian laskenassa huomioidaan myös kylmäsillat sekä johtumislämpöhäviö tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta. (9, s.18.)

Uuden D5:n mukaan johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi lasketaan rakennusosittain kaavalla 10 (9, s.18).

$$Q_{\text{joht}} = Q_{\text{ulkoseinä}} + Q_{\text{alapohja}} + Q_{\text{yläpohja}} + Q_{\text{ikkuna}} + Q_{\text{ovi}} + Q_{\text{muu}} + Q_{\text{kylmäsillat}} \quad \text{KAAVA 10}$$

Q_{joht} = johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi (kWh)

$Q_{\text{ulkoseinä}}$ = johtumislämpöhäviö ulkoseinien läpi (kWh)

Q_{alapohja} = johtumislämpöhäviö alapohjien läpi (kWh)

$Q_{\text{yläpohja}}$ = johtumislämpöhäviö yläpohjien läpi (kWh)

Q_{ikkuna} = johtumislämpöhäviö ikkunoiden läpi (kWh)

Q_{ovi} = johtumislämpöhäviö ulko-ovien läpi (kWh)

Q_{muu} = johtumislämpöhäviö tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta (kWh)

$Q_{kylmäsillat}$ = kylmäsiltojen johtumislämpöhäviö (kWh).

Mikäli rakennusosa rajoittuu ulkoilmaan, lasketaan lämpöhäviö kaavalla 11. Ulkoilmaan rajoittuvat osat ovat ulkoseinät, alapohja, yläpohja, ikkunat ja ovet. (9, s.18.)

$$Q_{rak.osa} = \sum U_i * A_i * (T_s - T_u) * \Delta t / 1000 \quad \text{KAAVA 11}$$

$Q_{rak.osa}$ = johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi (kWh)

U_i = rakennusosan i lämmönläpäisykerroin (W/(m²K))

A_i = rakennusosan i pinta-ala (m²)

T_s = sisäilman lämpötila (°C)

T_u = ulkoilman lämpötila (°C)

Δt = ajanjakson pituus (h)

1000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Kun lasketaan johtumislämpöhäviötä muuhun tilaan, ulkolämpötila T_u tulee korvata ylläolevassa kaavassa 7 muun tilan suunnittelulämpötilalla (9, s.19)

Rakennusosien välisten liitosten aiheuttamien kylmäsiltojen lämpöhäviöt lasketaan kaavalla 12 (9, s.19)

$$Q_{kylmäsillat} = \sum l_k * \Psi_k * (T_s - T_u) * \Delta t / 1000 \quad \text{KAAVA 12}$$

$Q_{kylmäsillat}$ = johtumislämpöhäviö kylmäsiltojen läpi (kWh)

l_k = viivamaisen kylmäsiltojen pituus (m)

Ψ_k = viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi (W/(m K))

T_s = sisäilman lämpötila (°C)

T_u = ulkoilman lämpötila (°C)

Δt = ajanjakson pituus (h)

1000 = kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Viivamaisten kylmäsilltojen lisäkonduktanssille on uudessa D5:ssa taulukoitu ohjearvoja joillakin runkomateriaaleilla (taulukko 3), joita voidaan käyttää, mikäli suunnitteluarvoja ei ole käytettävissä ja liitokset on toteutettu siten, että on pyritty minimoimaan liitosalueelle syntyvät kylmäsillat. Taulukkojen lisäkonduktanssit koskevat epäsäännöllisiä kylmäsilltoja, kun taas säännölliset kylmäsillat on otettu huomioon C4:n mukaan lasketuissa lämmönläpäisykertoimissa. Koska voidaan olettaa, että taulukoissa annetut lisäkonduktanssit ovat laskettu yläkanttiin, on niiden selvittäminen laskemalla joissain tapauksissa mielekäästä. Koska ikkunoiden lisäkonduktanssin laskennallinen selvittäminen vaatii ikkunan u-arvon laskemista, mikä on työlästä ja vaativaa, ei tässä työssä sitä selvitetty. (9, s.19; 18, s.8.)

TAULUKKO 3. Ohjearvoja viivamaisen kylmäsillan aiheuttamalle lisäkonduktanssille (9, s.19)

	Lisäkonduktanssi Ψ_k [W/(m*K)]					
	Ulkoseinän runkomateriaali					
	betoni	kevyt- betoni	kevyt- sora- betoni	tiili	puu	hirsi
Liitos						
Ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
Ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
ikkuna- ja oviliitos, lämmöneristeen kohdalla	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ikkuna- ja oviliitos, muussa tapauksessa	0,15	0,07	0,1	0,1	0,07	0,07

5 IKKUNOIDEN MALLINTAMINEN COMSOL MULTIPHYSICS -OHJELMALLA

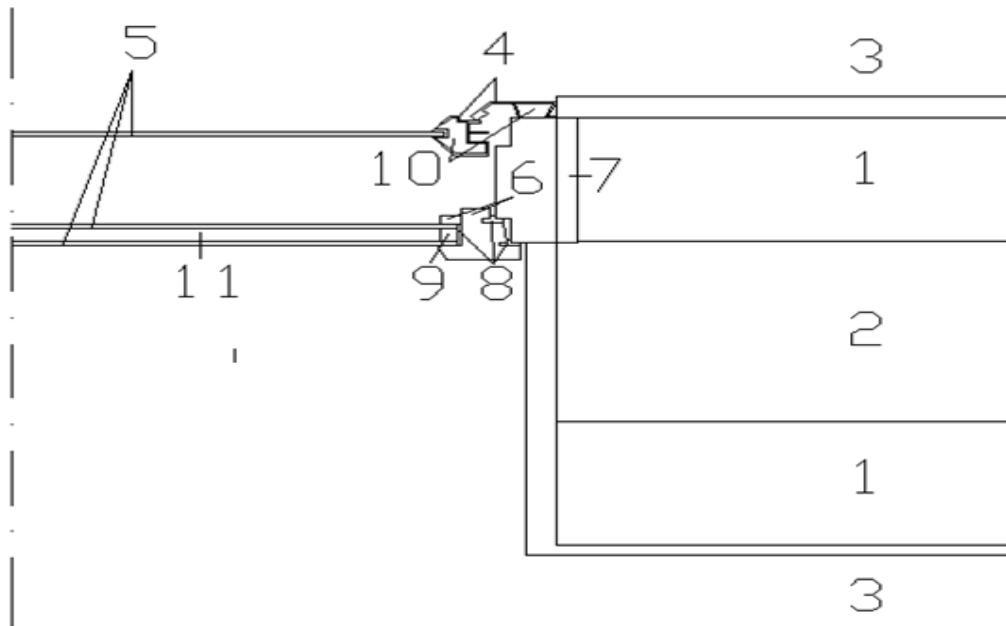
Työssä vertaillaan erityyppisten ikkunoiden lämpövirtoja. Tavoitteena on selvittää, kuinka suuri merkitys ikkunan valinalla ja asennustavalla on lämpöhäviöiden syntymiseen ja miten lämpöhäviöiden vaikutusta ikkunoissa voitaisiin vähentää.

Tutkittavaksi valittiin Domuskselta parhaat u-arvot omaavat MSE- ja MEK-ikkunat sekä kolmilasinen lasielementti. Kaikki ikkunat kuuluvat A-energia-luokkaan. Vertailun helpottamiseksi seinärakenne, johon ikkunat kiinnitettiin, on kaikissa sama. Ikkunavalmistaja käyttää ikkunoissaan TPS-listaa ja täytekaasuna argonia, lisäksi ikkunoissa on selektiivipinnoitteet. Selektiivipinnoitteiden mallintaminen Comsol multiphysics -ohjelmalla osoittautui kuitenkin sen verran hankalaksi, että luotettavien tulosten saamiseksi jätettiin pinnoitteet kokonaan pois mallinnuksesta. Vertailun vuoksi yksi ikkuna mallinnettiin lisäksi alumiinilistalla sekä käyttämällä täytekaasuna ilmaa.

Työssä käytetty 3-lasinen sisäänpäin aukeava Domuksen MSE-ikkuna täyttää A-luokan ikkunan vaatimukset ja soveltuu hyvin passiivirakentamiseen. Mallintamisen mahdollistamiseksi jouduttiin hieman yksinkertaistamaan ikkunan detalleja, mutta pääpiirteissään ikkunanrakenne on seuraavanlainen:

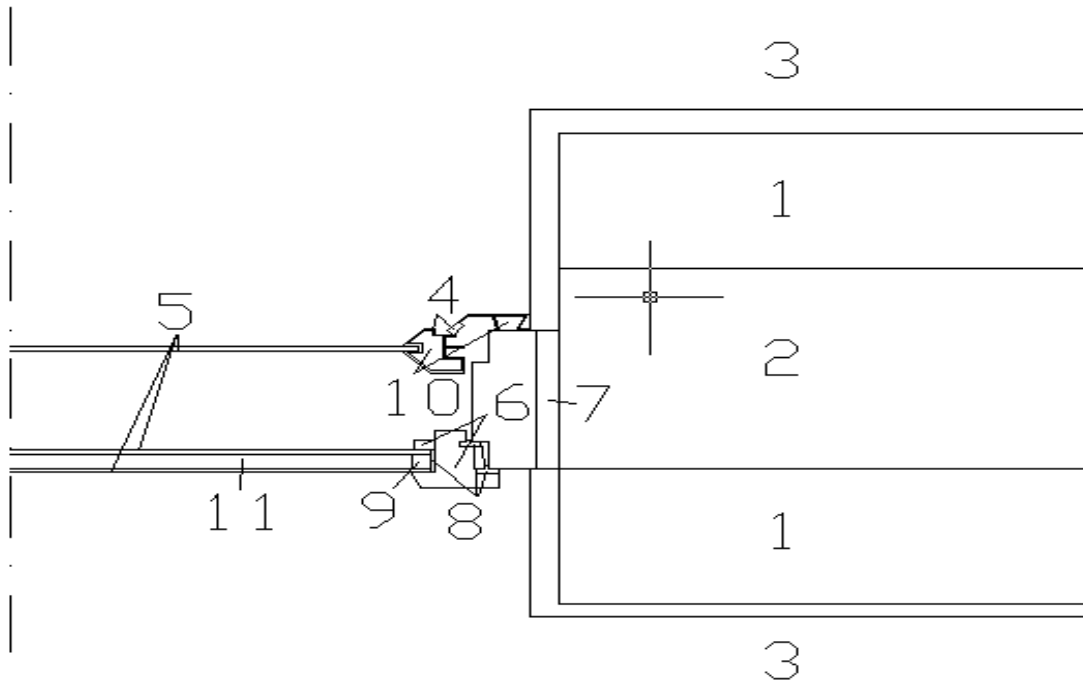
- Ulkopuitteessa on 4 mm:n lasi.
- Sisäpuitteessa on kaksinkertainen eristyslasi, jossa on 12 mm:n TPS-lämpömassalista.
- Lasien välissä on argonkaasua.
- Koko ulkopuite ja karmien ulkopinnat ovat alumiinia.
- Sisäpuite on puuta.

Käytetyt MSE-ikkunarakenteet sekä niissä käytetyt materiaalit on esitetty kuvissa 8 ja 9 sekä taulukossa 4. Kuvassa 8 on MSE-ikkunan mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on asennettu seinän tasoon.



KUVA 8. MSE-ikkuna

Kuvassa 9 on MSE-ikkunan mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on kiinnitetty eristeen kohdalle.



KUVA 9. MSE-ikkuna

Taulukosta 4 selviää kaikissa ikkunarakenteissa käytetyt materiaaliominaisuudet.

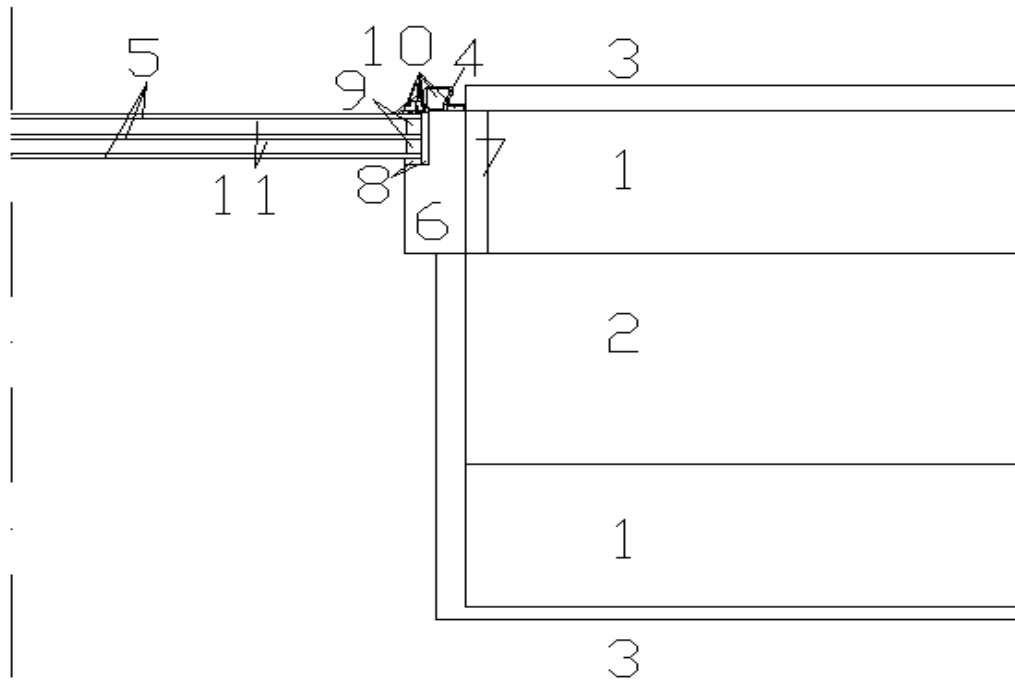
TAULUKKO 4. Käytetyt materiaaliominaisuudet (8, s. 17 – 21)

	Materiaali	Lämmönjohtavuuden arvo	yksikkö
1	Betoni	2	W/m*K
2	Eistemateriaali	0,021	W/m*K
3	Rappaus	0,27	W/m*K
4	Alumiini	160	W/m*K
5	Lasi	1	W/m*K
6	Puu	0,12	W/m*K
7	Eistemateriaali2	0,02	W/m*K
8	Tiiviste	0,13	W/m*K
9	TPS	0,315	W/m*K
10	Ilma	0,026	W/m*K
11	Argon	0,017	W/m*K

Toinen työssä käytetty ikkuna on Domuksen kiinteä, kolmilasinen MEK-ikkuna. Se on hyvin lämpöeristävä, A-luokan passiivitason ikkuna. Ikkunanrakenne on seuraavanlainen:

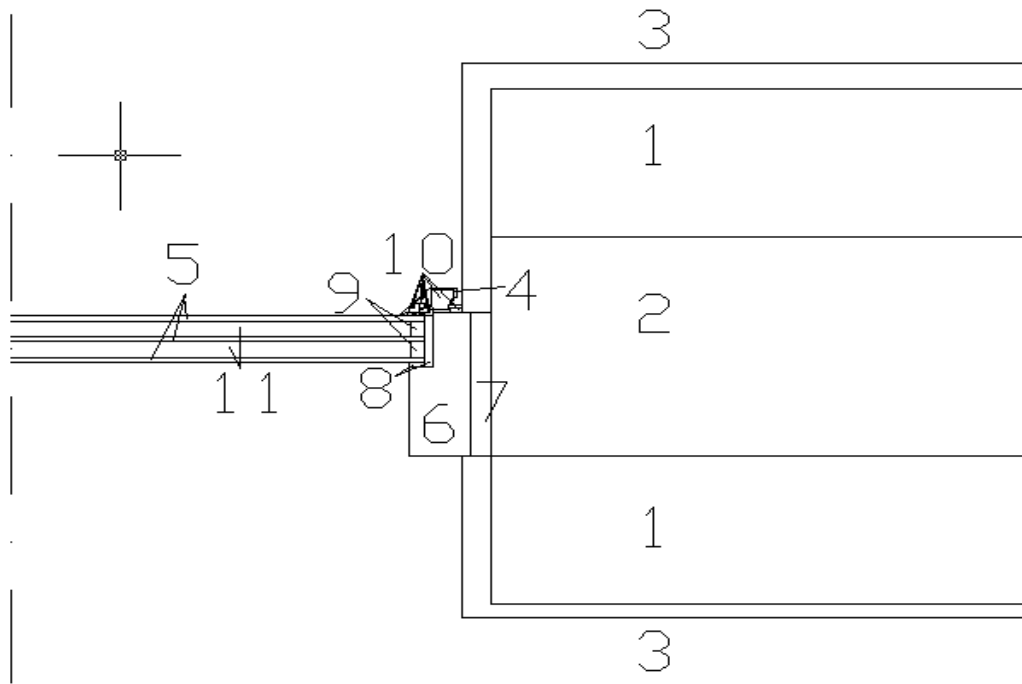
- kolminkertainen 4 mm:n lasi
- lasien välissä argonkaasua
- sekä sisä- että ulkopuolella tiivisteet
- karmien ulkopinnat alumiinia.

Käytetyt MEK-ikkunarakenteet on esitetty kuvista 10 ja 11. Kuvassa 10 on MEK-ikkunan mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on kiinnitetty seinän ulkopintaan.



KUVA 10. MEK-ikkuna

Kuvassa 11 on MEK-ikkunan mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on kiinnitetty eristeen kohdalle.

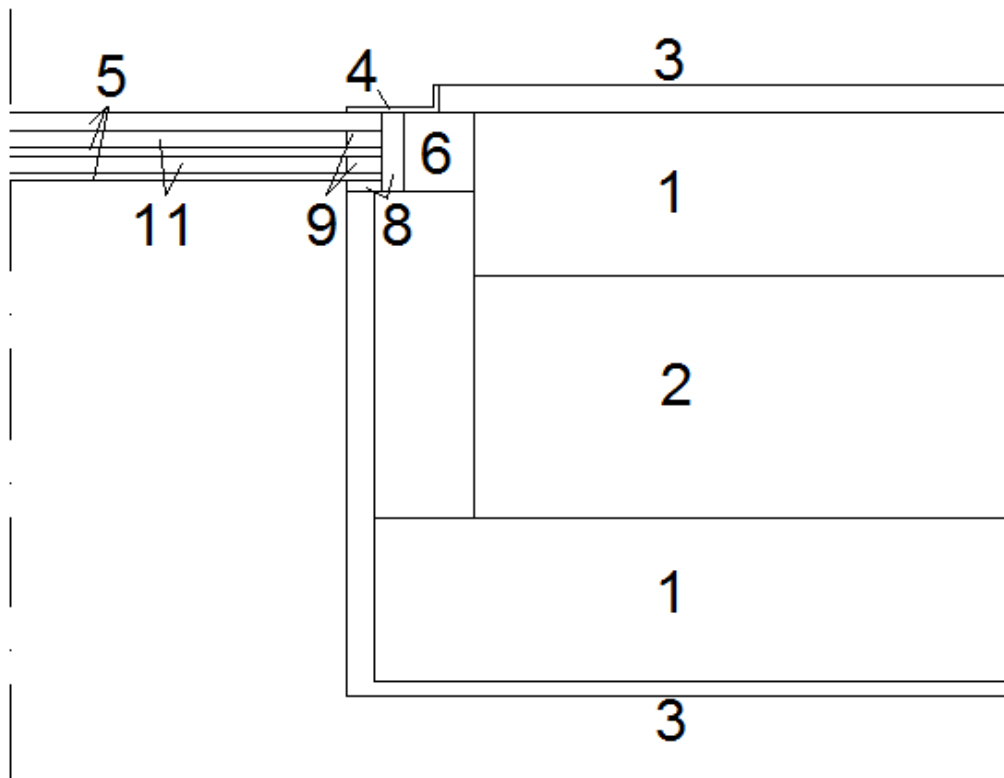


KUVA 11. MEK-ikkuna

Kolmas ikkunatyyppe on kiinteä kolmilasinen lasielementti, joka asennetaan suoraan seinään. Ikkunanrakenne on seuraavanlainen:

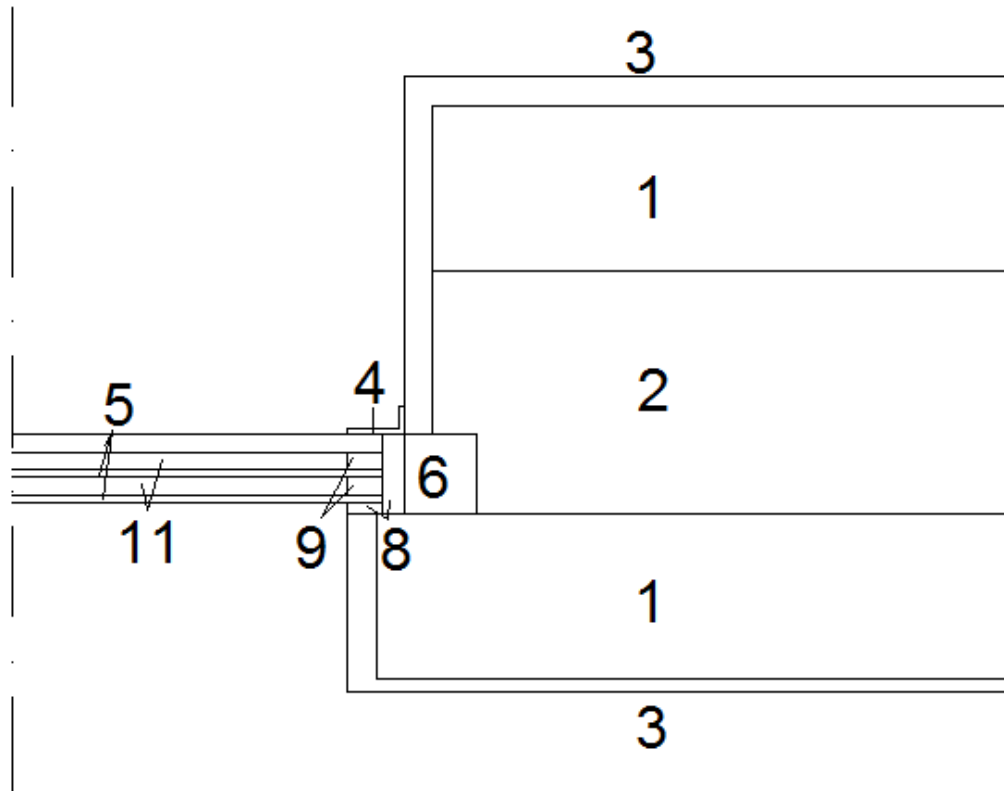
- ulommainen lasi 12 mm
- kaksi 6 mm:n lasia
- lasien välissä 12 mm:n TPS-lämpömassalista ja argon-kaasu.

Käytetyt lasielementtirakenteet ja niissä käytetyt materiaalit löytyvät kuvista 12 ja 13 sekä taulukosta 4 sivulla 31. Kuvassa 12 lasielementin mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on kiinnitetty seinän ulkopintaan.



KUVA 12. Lasielementti

Kuvassa 13 lasielementin mallinnuksessa käytetty yksinkertaistettu kuva, kun ikkuna on kiinnitetty eristeen kohdalle.



KUVA 13. lasielementti

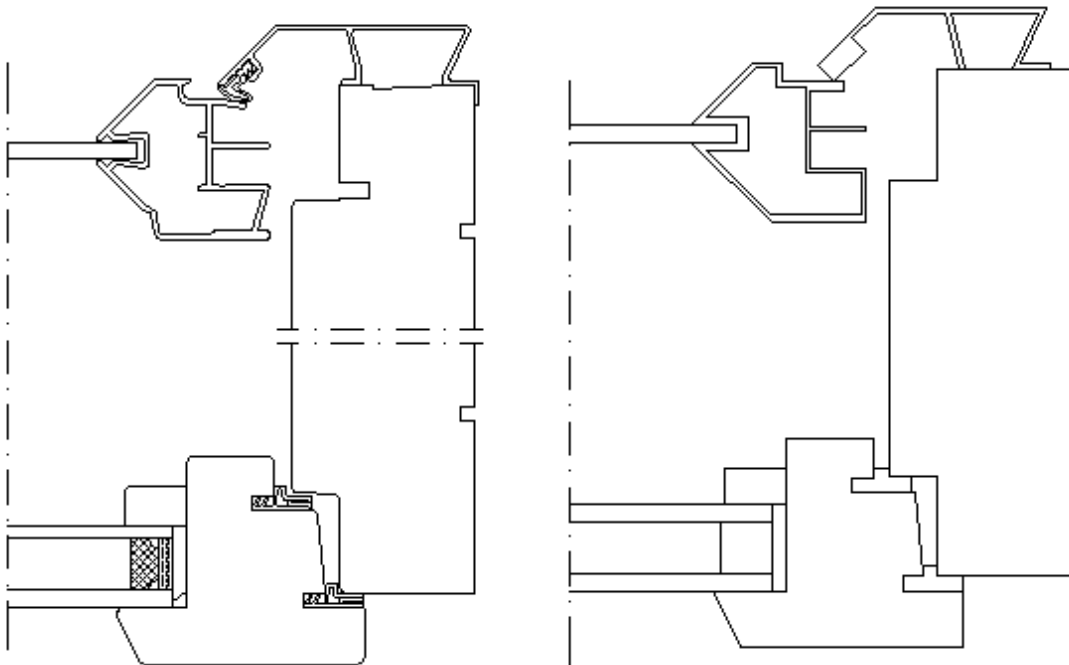
5.1 Mallinnusohjelman valinta

Mallinnusohjelmaksi valittiin Comsol multiphysics -ohjelmisto, joka on monifysi-
kaalinen mallinnusohjelmisto. Se on Matlab-ympäristöön kehitetty elementtime-
netelmään perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeeriseen ratkaisuun
tarkoitettu ohjelma. Sillä voidaan mallintaa fysikaalisia ilmiöitä ja se soveltuu
muun muassa lämmönsiirtoprosessien ja rakenteiden mekaniikan aloille. (18.)

Työssä käytettiin Comsol Multiphysics -versiota 4.2, joka on tällä hetkellä uusin
versio. Nykyinen versio on kehittynyt FEMLAB-ohjelmistosta, johon on aiempien
Comsol Multiphysics -versioiden myötä lisätty muun muassa lisää laskentate-
hoa, useita uusia ratkaisijoita sekä monia muita ominaisuuksia. (18.)

5.2 Mallintaminen

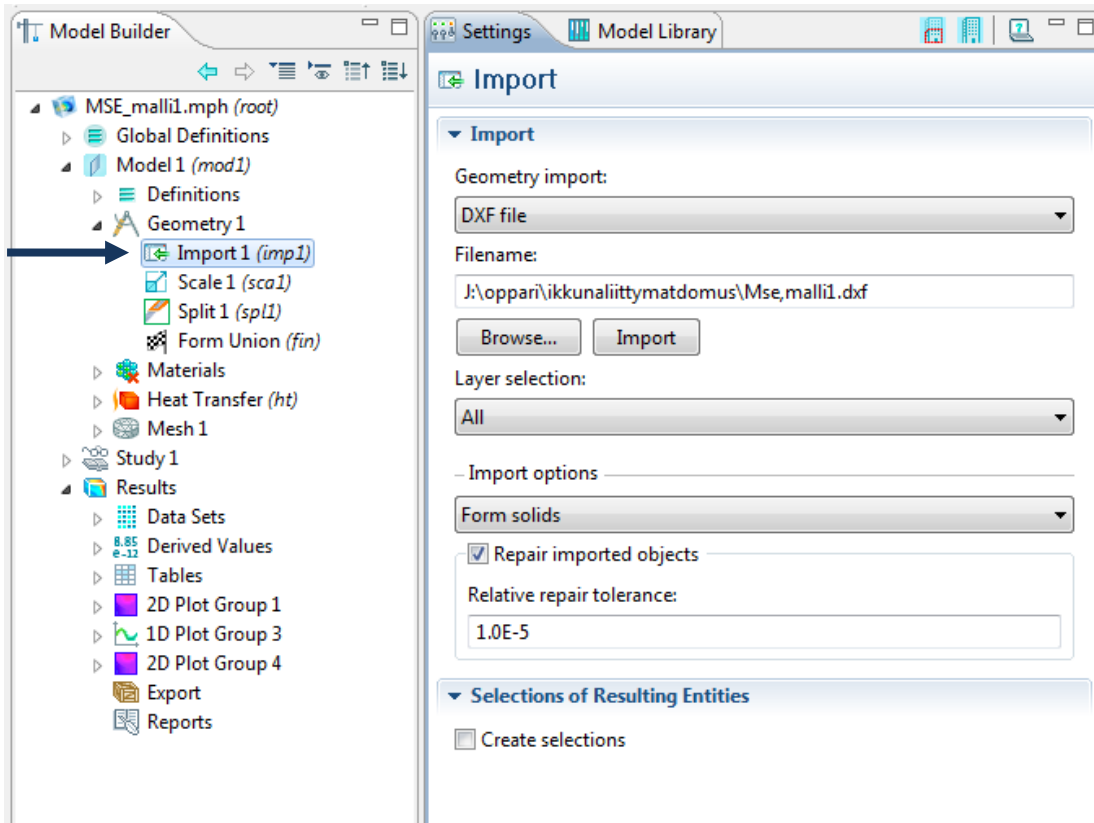
Ikkunoiden mallintaminen aloitettiin yksinkertaistamalla Domus yhtiöt Oy:ltä saatuja ikkunadetaljeja AutoCAD-ohjelmalla. Ikkunoista täytyi poistaa pienimpiä yksityiskohtia ja esimerkiksi alumiinilistojen muotoa täytyi muokata suoraviivaisemmaksi (kuva 14). Tämän jälkeen ikkunat liitettiin seinärakenteeseen kahdella eri tavalla (kuvat 8 - 13), seinän ulkopintaan ja eristeen sisäreunaan. Jotta ikkunat olisivat keskenään vertailukelpoisia, otettiin mallinnettaviin kuviin molempiin metrin pituudelta seinää ja puolen metrin pituudelta ikkunaa. Koska selektiivikalvojen mallintaminen osoittautui liian työlääksi, jätettiin ne luotettavampien tulosten saamiseksi kokonaan pois mallintamisvaiheesta.



KUVA 14. Oikealla on ikkunan alkuperäinen detalji ja vasemmalla yksinkertaistettu, mallintamisessa käytetty detalji

Kun kuvat oli piirretty AutoCAD-ohjelmalla ja varmistuttu siitä, että yksittäiset materiaalialueet olivat yhtenäisiä, tuotiin kuvat import-toiminon avulla Comsol multiphysics -ohjelmaan (kuva 15). Kun kuva on tuotu ohjelmaan, tulee sille määrittää materiaaliominaisuudet. Jokainen materiaali merkattiin erikseen ja sille

annettiin lämmönjohtavuuden arvo, joka löytyy rakentamismääräysten osasta C4. Tässä työssä käytetyt materiaaliominaisuudet löytyvät taulukosta 4 sivulla 31. Comsol multiphysics -ohjelmassa rakenteelle määritetään myös pintavas-
tukset, joille löytyvät arvot taulukosta 2 sivulta 24. Kun tarvittavat arvot oli määri-
tely, laitettiin ohjelma laskemaan rakenteet.



KUVA 15. Näkymä Comsol multiphysics -ohjelmasta

Comsol multiphysics -ohjelmasta voidaan poimia erilaisia tietoja sen mukaan, mitä halutaan tietää. Tässä työssä tutkittiin lämpövirtaa ikkunan sisäpinnassa. Vertailun vuoksi mallinnettiin ikkunat eri materiaaliominaisuuksilla sen lisäksi, että mallinnettiin kolme erityyppistä ikkunaa kahdessa eri kohdassa seinää.

Comsol multiphysics -ohjelmisto tarjoaa paljon ominaisuuksia, mutta ehkä myös tästä syystä se vaatii paljon perehtymistä ohjelman käyttöön, jotta siitä saataisiin mahdollisimman paljon irti. Ikkunoiden mallintamiseen Comsol multiphysics

-ohjelmalla ei löytynyt juurikaan ohjeistusta, joten käytettiin yleisiä mallintamiseen liittyviä ohjeita.

6 IKKUNALIITTYMIEN LÄMPÖVIR RAT

Koska lämpö pyrkii tasoittumaan lämpimämmän ja kylmemmän tilan välillä, tapahtuu kaikissa rakenteissa lämmönvirtaamista. Ikkunoissa lämmönvirtaamista sisältä ulospäin tapahtuu eniten liittymäkohdissa. Tässä työssä keskityttiin ikkunarakenteen sisäpintojen lämpövirtojen tutkimiseen. Virheiden minimoimiseksi rakenteet pyrittiin tekemään mahdollisimman samankaltaisiksi keskenään ja seinärakenne, joihin ikkunat kiinnitettiin, pidettiin vakiona. Ulko- ja sisälämpötilan eroksi syötettiin ohjelmaan 1°C. Kaikki Comsol multiphysics -ohjelmistolla tehdyt mallit ja tulokset löytyvät liitteistä 1 - 3.

6.1 Lämpövirrat MSE-ikkunassa

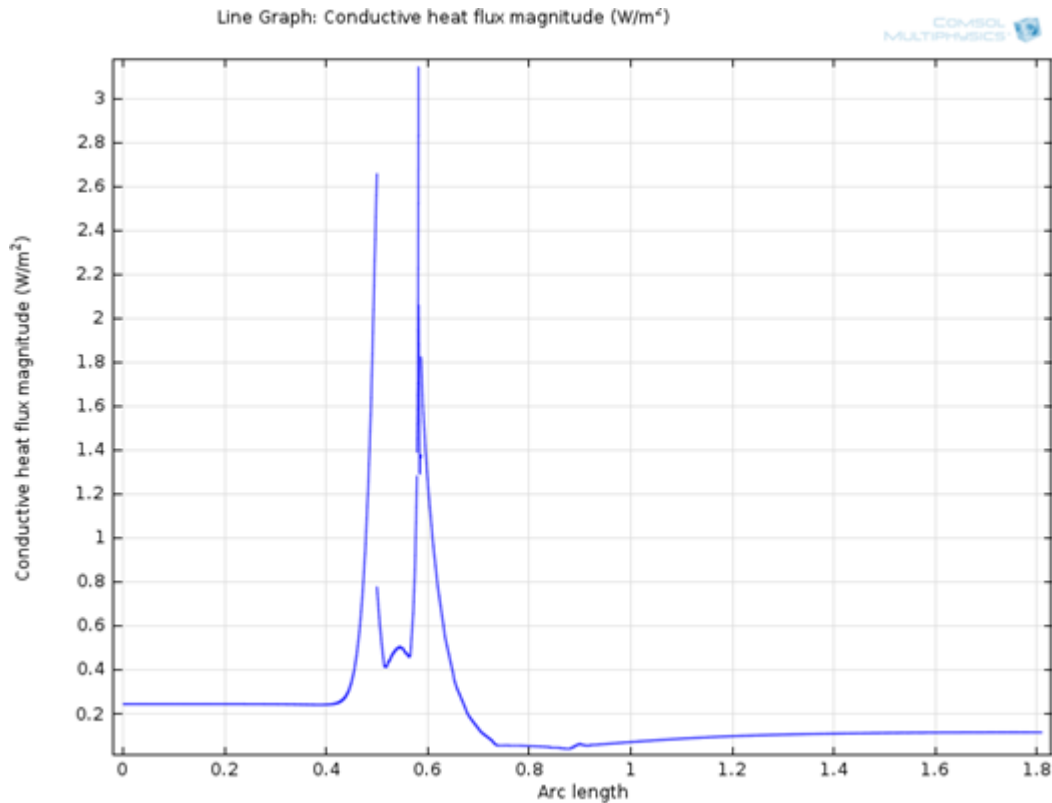
Jokaisesta ikkunatyypistä mallinnettiin kaksi eri tapausta, joista toinen oli ikkuna kiinnitettynä ulkoseinäpinnan tasolle ja toinen ikkuna kiinnitettynä eristeen sisäpinnan tason kanssa samaan tasoon. Lisäksi MSE-ikkuna mallinnettiin kahdella eri lista- ja välikaasumateriaalilla.

Verrattaessa asennustavan vaikutusta lämpövirtaan MSE-ikkunalla antoi Comsol Multiphysics -ohjelmisto eroksi 0,07 W/m²*K. Kun taas verrataan ikkunamateriaalien vaikutusta lämpövirtaan, on erot 0,01 W/m²*K luokkaa. Asennustavalla siis voidaan todeta saatavan isompia parannuksia aikaan kuin ikkunan materiaaleja vaihtamalla. Taulukossa 6 näkyvät tarkemmat erot eri tilanteiden välillä.

TAULUKKO 6. Lämpövirtojen erot rakenteen sisäpinnassa

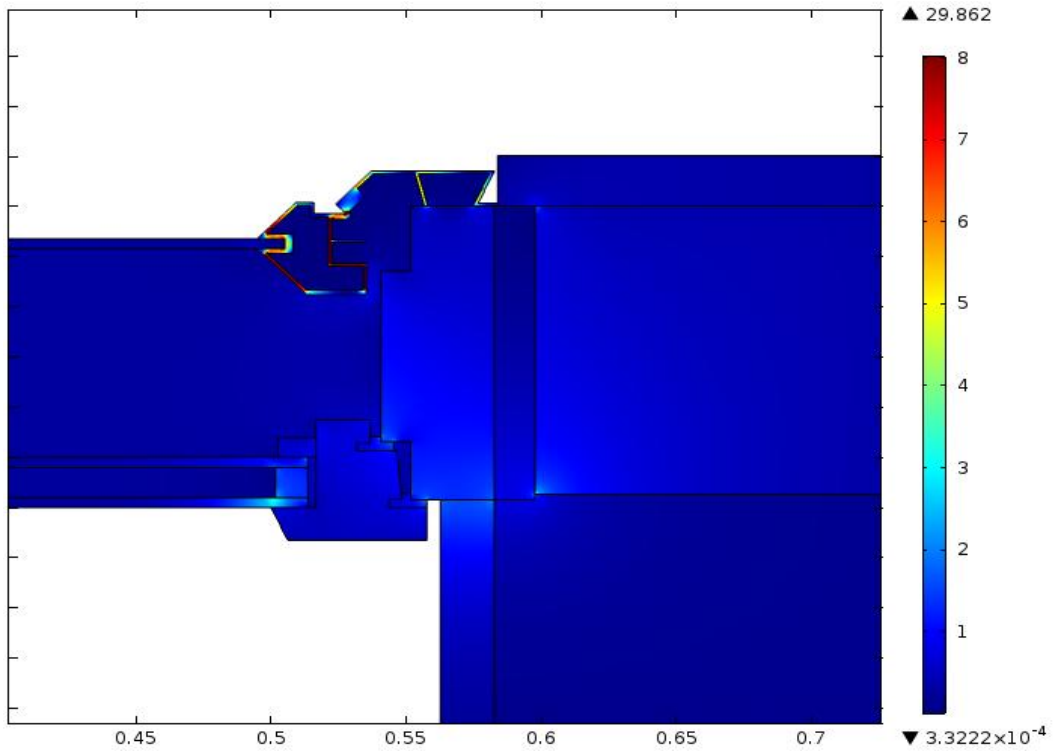
Rakenne	Lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty seinän tasoon	Yksikkö	lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty eristeen kohdalla	Yksikkö
MSE, tps+arg.	0,3917	W/m ² *K	0,32405	W/m ² *K
MSE, tps+ilma	0,39305	W/m ² *K	-	W/m ² *K
MSE, al.+arg	0,40944	W/m ² *K	-	W/m ² *K
MSE, al.+ilma	0,40913	W/m ² *K	-	W/m ² *K

Kuvassa 16 näkyy, kuinka johtamalla tapahtuva lämpövirta vaihtelee ikkunan liitoskohdassa. Kuvasta nähdään, että vaihelua tapahtuu noin 3 W/m^2 . Voisi olla mielekäästä tutkia, johtuvatko kuvassa näkyvät piikit rakenteen yksinkertaistuksista vai tulisiko rakenteeseen tehdä niille osin muutoksia parempien tulosten saamiseksi.

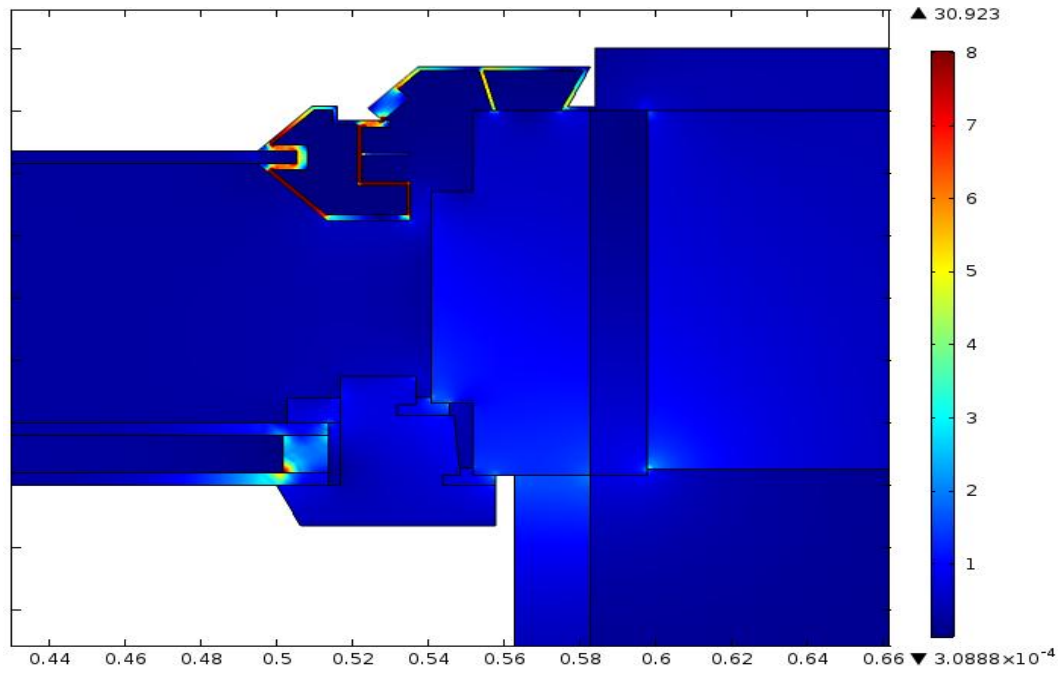


KUVA 16. Lämpövirran vaihtelut MSE-ikkunarakenteessa

Kuvissa 17 ja 18 näkyy ikkunan, jossa on käytetty TPS-listaa ja täytekaasuna argonia, lämpövirran ero verrattuna ikkunaan, jossa on käytetty alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa. Voidaan havaita, että eniten lämpövirtaa tapahtuu alumiinissa ulkopuitteissa ja -karmeissa sekä alumiinisessa välilistassa. Tämä johtuu siitä, että alumiinilla on huomattavasti suurempi lämmönjohtavuuskyky kuin muilla ikkunassa käytetyillä materiaaleilla. Kuvissa lämpövirran yksikkö on $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



KUVA 17. MSE-ikkunan liittymä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana TPS-lista ja täytekaasuna argon



KUVA 18. MSE-ikkunan liittymä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana alumiinilista ja täytekaasuna ilma

6.2 Lämpövirrat MEK-ikkunassa

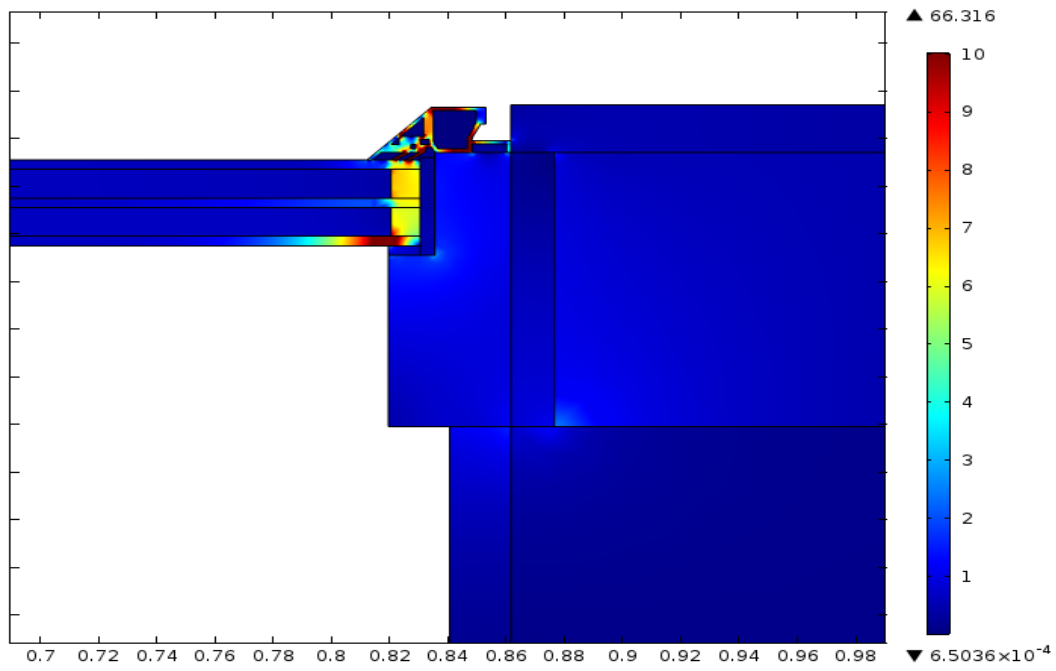
Myös MEK-ikkunatyypille mallinnettiin kaksi eri tapausta, joista toinen oli ikkuna kiinnitettynä ulkoseinäpinnan tasolle ja toinen ikkuna kiinnitettynä eristeen sisäpinnan tason kanssa samaan tasoon. Lisäksi MEK-ikkuna mallinnettiin käyttäen ikkunassa alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa.

Verrattaessa asennustavan vaikutusta lämpövirtaan MEK-ikkunalla, antoi comsol multiphysics -ohjelmisto eroksi 0,1 W/m²*K, joka on suurempi kuin MSE-ikkunan asennustapoja vertailtaessa, jolloin eroksi saatiin 0,07 W/m²*K. Verrattaessa ikkunamateriaalien vaikutusta lämpövirtaan, saatiin eroksi jopa 0,44 W/m²*K. MEK-ikkunalla materiaalivalinnoilla on siis huomattavasti suurempi vaikutus lämpövirtoihin kuin MSE-ikkunalla. Taulukossa 7 näkyvät tarkemmat erot eri tilanteiden välillä.

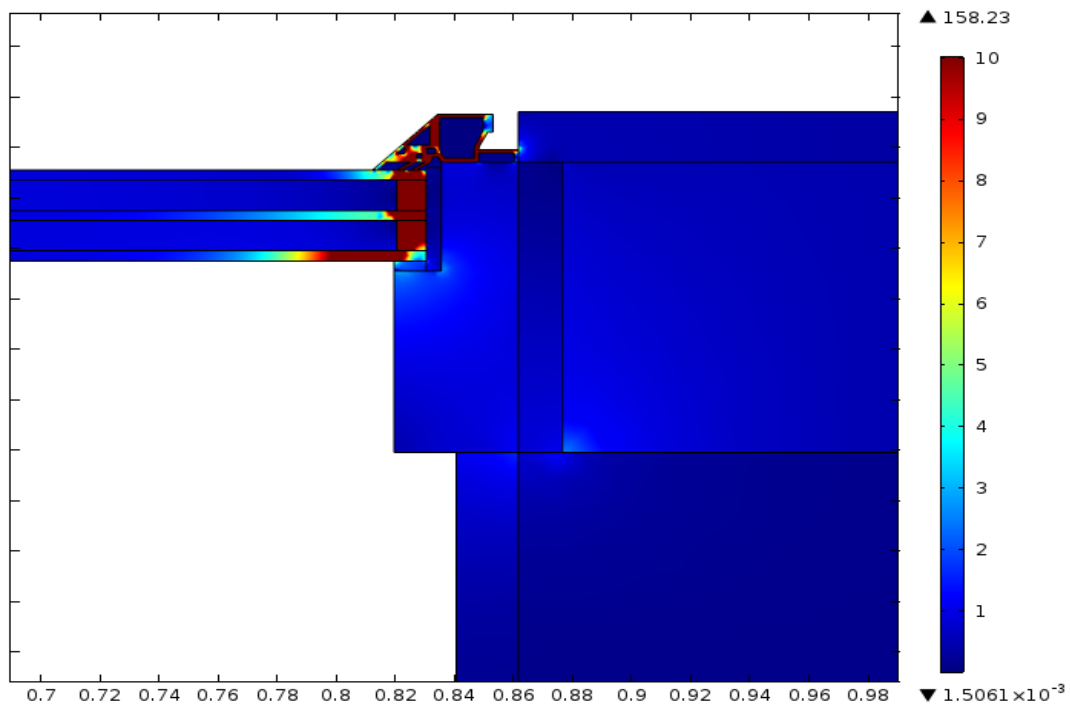
TAULUKKO 7. Lämpövirtojen erot rakenteen sisäpinnassa

Rakenne	Lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty seinän tasoon	Yksikkö	lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty eristeen kohdalla	Yksikkö
MEK,tps+arg.	0,80366	W/m ² *K	0,70361	W/m ² *K
MEK,al.+ilma	1,24529	W/m ² *K	-	W/m ² *K

Kuvissa 19 ja 20 näkyy ikkunan, jossa on käytetty TPS-listaa ja täytekaasuna argonia, lämpövirran ero verrattuna ikkunaan, jossa on käytetty alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa. Kuten aiemmin todettiin, on MEK-ikkunatyypissä paljon suurempi vaikutus sillä, mitä materiaaleja ikkunaan valitaan. Kuvasta nähdään, että alumiiniset listat johtavat voimakkaasti lämpöä. Lämpövirran yksikkö kuvissa on W/(m²*K).



KUVA 19. MEK-ikkunan liittämä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana TPS-lista ja täytekaasuna argon



KUVA 20. MEK-ikkunan liittämä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana alumiinilista ja täytekaasuna ilma

6.3 Lämpövirrat lasielementissä

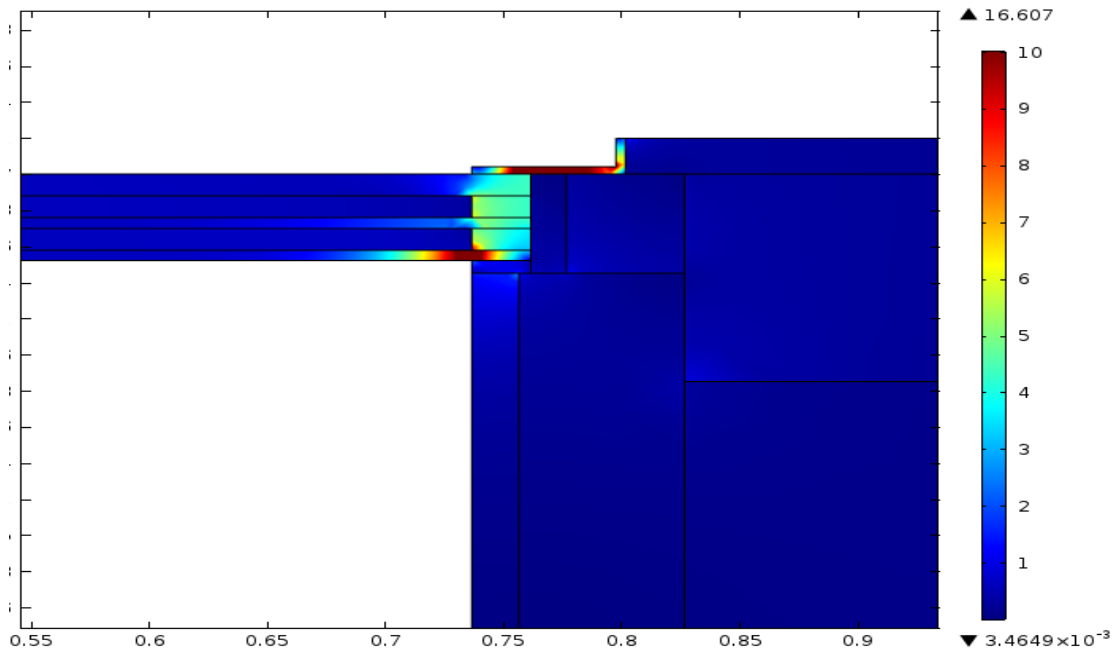
Kolmilasisesta kiinteästä lasielementistä mallinnettiin samaan tapaan kuin MSE- ja MEK-ikkunarakenteista kaksi eri tapautta, joista toinen oli elementti kiinnitettyä ulkoseinäpinnan tasolle ja toinen elementti kiinnitettynä eristeen sisäpinnan tason kanssa samaan tasoon. Näiden lisäksi elementti mallinnettiin käyttäen ikkunassa alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa, koska niillä on suurimmat lämmönjohtavuuden arvot muihin lista- ja kaasuvaihtoehtoihin verrattuna.

Kun verrattiin asennustavan vaikutusta lämpövirtaan lasielementillä, antoi Comsol Multiphysics -ohjelmisto eroksi 0,01 W/m²*K, joka on pienempi kuin muilla ikkunoilla. Kun verrataan ikkunamateriaalien vaikutusta lämpövirtaan, on ero 0,37 W/m²*K. Materiaalivalintojen vaikutus lasielementissä on pienempi kuin MEK-ikkunalla, mutta kuitenkin huomattavasti suurempi kuin MSE-ikkunalla. Taulukossa 8 näkyvät tarkemmat erot eri tilanteiden välillä.

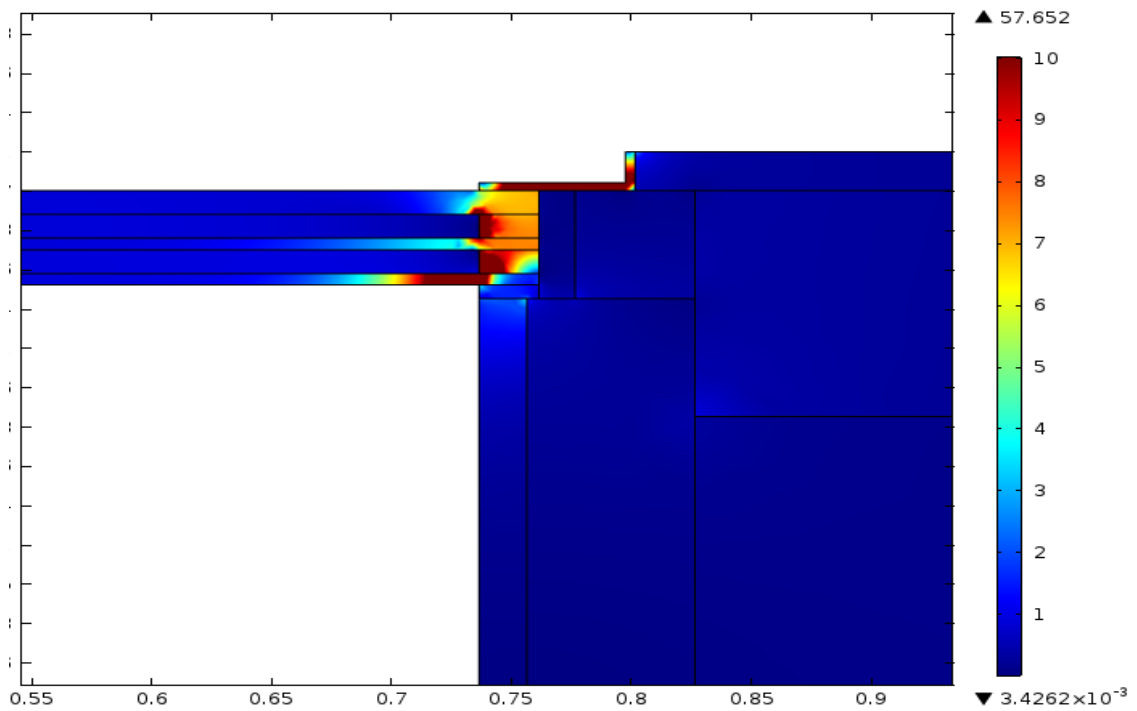
TAULUKKO 8. Lämpövirtojen erot rakenteen sisäpinnassa

Rakenne	Lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty seinän tasoon	Yksikkö	lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty eristeen kohdalla	Yksikkö
Elementti,tps+arg.	0,81023	W/m ² *K	0,82125	W/m ² *K
Elementti,al.+ilma	1,18951	W/m ² *K	-	-

Kuvissa 21 ja 22 näkyy ikkunan, jossa on käytetty TPS-listaa ja täytekaasuna argonia, lämpövirran ero verrattuna ikkunaan, jossa on käytetty alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa. Lasielementti ratkaisussa ei alumiinilistalla ole yhtä suurta vaikutusta kuin MEK-ikkunassa, mutta vaikutus on kuitenkin huomattava verrattuna TPS-listalliseen elementtiin. Kuvissa lämpövirran yksikkö on W/(m²*K).



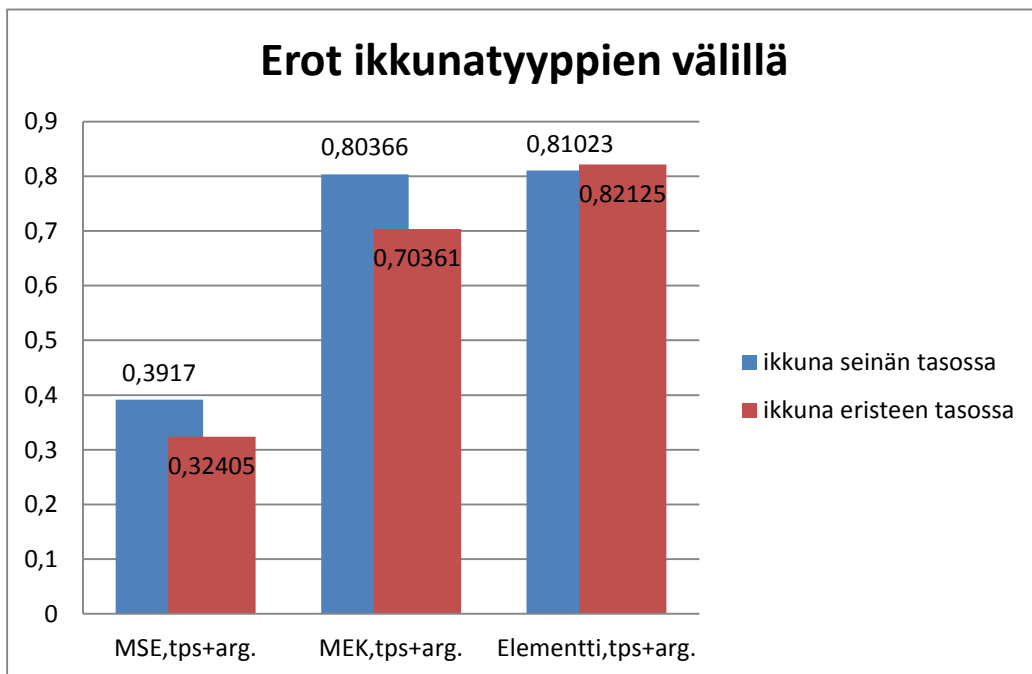
KUVA 21. Kiinteän lasielementin liittymä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana TPS-lista ja täytekaasuna argon



KUVA 22. Kiinteän lasielementin liittymä seinärakenteen ulkopintaan, välilistana alumiinilista ja täytekaasuna ilma

6.4 Lämpövirtojen erot ikkunoiden välillä

Kun vertaillaan eri ikkunatyyppejen, asennustavan ja ikkunan materiaalien vaikutusta ikkunan sisäpinnassa tapahtuvaan lämpövirtaan, voidaan havaita suuria eroja. Parhaat lukemat saatiin MSE-ikkunatyypillä, kun ikkuna on asennettu eristeen tasolle, välilistana on käytetty TPS-listaa ja täytekaasuna argonia. Tällöin saadun lämpövirran arvo on $0,32 \text{ W / m} \cdot \text{K}$, mikä on kolme kertaa parempi, kuin huonoin saatu tulos (kuva 23). Huonoin tulos tässä työssä saatiin MEK-ikkunatyypillä, kun ikkuna on asennettu seinän ulkopintaan ja välilistana oli käytetty alumiinilistaa ja täytekaasuna ilmaa. Tarkemmat erot eri vaihtoehtojen välillä löytyvät taulukosta 9.

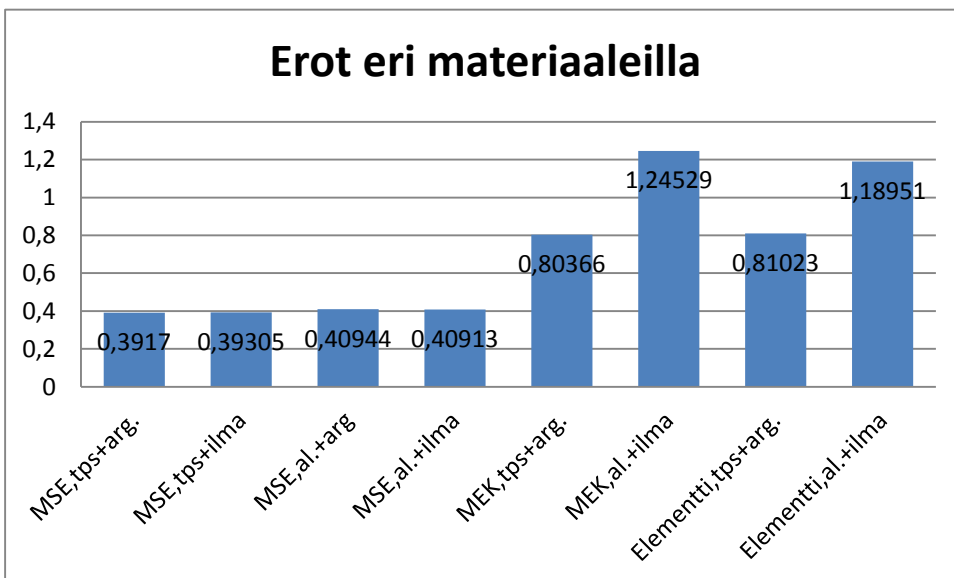


KUVA 23. Lämpövirrat sisäpinnassa eri asennustavoilla ja ikkunatyypeillä

TAULUKKO 9. Lämpövirtojen erot eri ikkunoiden ja asennustapojen välillä

Rakenne	Lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty seinän tasoon	Yksikkö	lämpövirta rakenteen sisäpinnassa, kun ikkuna kiinnitetty eristeen kohdalla	Yksikkö
MSE,tps+arg.	0,3917	W/m*K	0,32405	W/m*K
MSE,tps+ilma	0,39305	W/m*K	-	W/m*K
MSE,al.+arg	0,40944	W/m*K	-	W/m*K
MSE,al.+ilma	0,40913	W/m*K	-	W/m*K
MEK,tps+arg.	0,80366	W/m*K	0,70361	W/m*K
MEK,al.+ilma	1,24529	W/m*K	-	W/m*K
Elementti,tps+arg.	0,81023	W/m*K	0,82125	W/m*K
Elementti,al.+ilma	1,18951	W/m*K	-	W/m*K

Tulosten perusteella asennustavalla ja materiaalien valinnalla on vähiten vaikutusta MSE-ikkunaan. Kaikissa MSE-ikkunarakenteissa sisäpinnan lämpövirta on noin puolet pienempi kuin MEK-ikkunalla ja lasielementillä. Asennustavalla ja materiaalivalinnoilla näyttäisi olevan eniten vaikutusta MEK-ikkunaan, jolla suurin ero oli jopa $0,54 \text{ W / m * K}$. Kuvasta 24 voidaan nähdä materiaalivalintojen vaikutus ikkunan sisäpinnan lämpövirtaan, kun ikkuna on asennettu seinän tasoon. Suurin ero on MEK-ikkunalla $0,44 \text{ W / m * K}$.



KUVA 24. Materiaalien vaikutus lämpövirtaan

Virhettä saatuihin tuloksiin voi aiheuttaa se, että detaljeja jouduttiin yksinkertaistamaan ja joitakin yksityiskohtia poistettiin kokonaan. Voisi olla mielekäästä tutkia myös, kuinka paljon selektiivikalvojen poisjättäminen vaikutti saatuihin tuloksiin. Ikkunaelementin kohdalla hieman erilainen kiinnitystapa seinään voi myös aiheuttaa virhettä tuloksiin.

7 YHTEENVETO

Tässä työssä pyrittiin selvittämään, mikä olisi ikkunan optimaalinen sijoituspaikka seinärakenteessa, miten materiaalivalinnat vaikuttavat ikkunan lämpövirtaan ja miten ikkunoiden lämpöhäviöt saataisiin mahdollisimmat pieniksi. Saaduista tuloksista voitiin päätellä, että lämpövirtojen kannalta katsottuna MSE-ikkuna on paras vaihtoehto, koska lämpövirta ikkunan pinnassa oli MSE-ikkunalla noin puolet pienempi kuin MEK-ikkunalla ja lasielementillä. Asennustavaltaan ikkunan asentaminen eristeen kohdalle oli hieman parempi ratkaisu kuin seinän tasoon asentaminen. Voitiin myös todeta, että materiaalivalinnat vaikuttivat enemmän MEK-ikkunaan ja lasielementtiin kuin MSE-ikkunaan.

Virhettä tuloksiin saattaa aiheuttaa detaljien yksinkertaistaminen ja yksityiskoh- tien poisjättäminen. Esimerkiksi selektiivikalvojen vaikutus lämpövirtaan olisi mielekäästä tutkia. Koska tässä työssä käytettiin vain Comsol Multiphysics -ohjelmistoa, olisi rakenteet hyvä tarkastella myös jollakin muulla ohjelmalla tai esimerkiksi mittaamalla todellisissa kohteissa. Täytyy myös muistaa, että tässä työssä tarkasteltiin vain yhtä lämmönsiirtymismuotoa eli johtumista eikä ikkunan valintaa voi tehdä pelkästään sen perusteella.

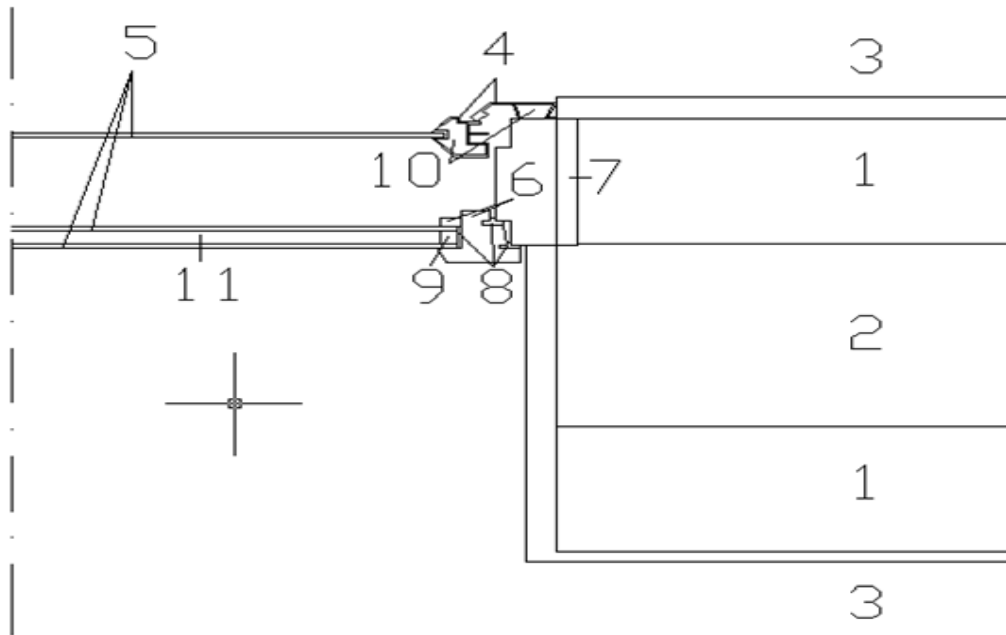
Tavoitteena tässä työssä oli löytää ikkunan optimaalinen sijoittelu seinäraken- teessa ja selvittää, miten voidaan vähentää ikkunoiden lämpöhäviöitä. Lämpö- virtoja ikkunan sisäpinnassa tarkastelemalla saatiin ikkunan parhaaksi sijoitus- paikaksi seinässä eristeen kohta. Erot asennustapojen välillä olivat kuitenkin sen verran pieniä, että varmojen johtopäätöksien tekemiseksi olisi hyvä tehdä vielä lisätutkimuksia esimerkiksi mittaamalla. Lämpöhäviöitä todettiin voitavan vähentää valitsemalla mahdollisimman vähän lämpöjohtavia materiaaleja. Voi- daankin todeta, että mikäli halutaan rakentaa myös ikkunoiden osalta energia- tehokasrakennus, kannattaa ikkunoiden valinta, sijoittaminen ja pienimmätkin detaljit suunnitella ja tarkastella huolella, koska näin voidaan saada isoja ero- ja aikaan.

LÄHTEET

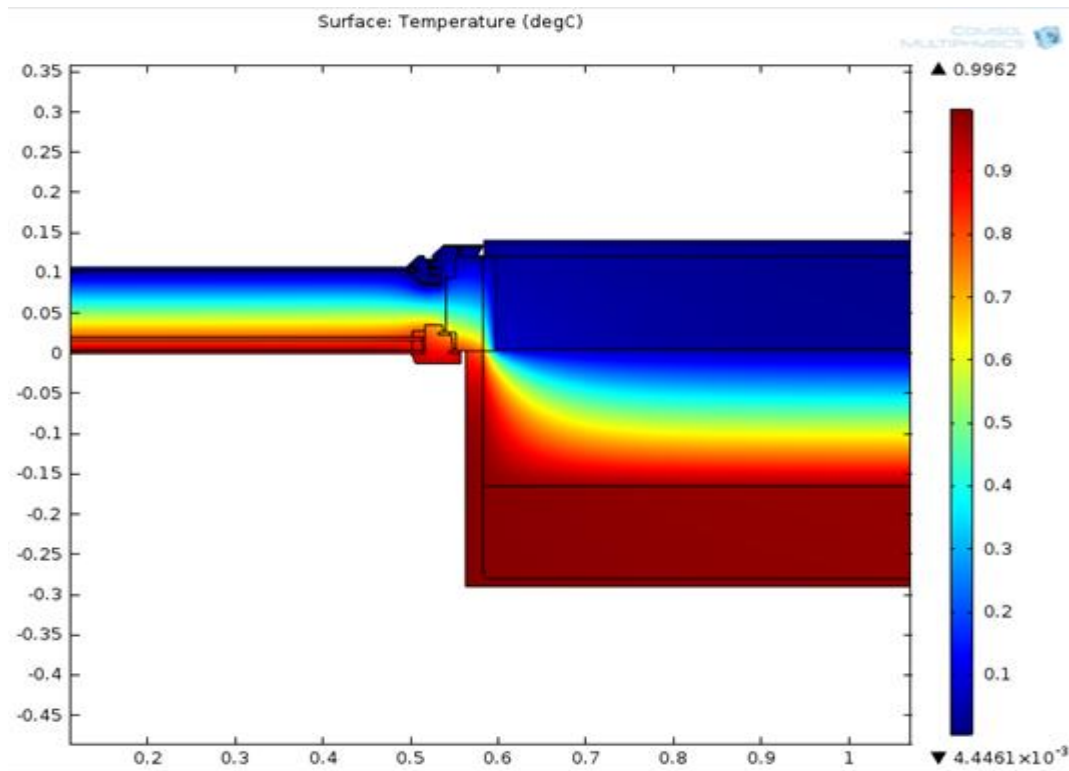
1. Ikkunat ja niiden suuntaus. 2011. Saatavissa:
<http://www.energiatehokaskoti.fi>. Hakupäivä 11.11.2011.
2. Vapaavuori, Jan 2008. Rakennusten energiatehokkuus. Saatavissa:
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=83834>. Hakupäivä 11.1.2012.
3. Maankäyttö ja rakentaminen. 2012. Ympäristöministeriö. Saatavissa:
[www.ymparisto .fi](http://www.ymparisto.fi). Hakupäivä 11.1.2012.
4. Valtioneuvoston tulevaisuusselonteko ilmasto- ja energiapolitiikasta. 2009. Valtioneuvoston kanslia. Saatavissa: http://vnk.fi/julkaisukansio/2009/j28-ilmasto-selonteko-j29-klimat-framtidsredogorelse-j30-climate_/pdf/fi.pdf. Hakupäivä 29.2.2012.
5. Kempainen, Jani 2011. Uusien rakennusten energiamääräykset 2012. Saatavissa:
<http://www.rakennusteollisuus.fi/download.aspx?intFileID=2564&intLinkedFromObjectID=9780>. Hakupäivä 29.2.2012.
6. Uusien vuoden 2012 Rakentamismääräysten vaikutuksista energialaskentaan. 2010. Laatija Lamit.fi. Saatavissa:
http://www.lamit.fi/pdf/20101025_uudet_maaraykset_2012_lamit.pdf. Hakupäivä 9.12.2011.
7. Rakennusten energiatehokkuuden määräykset ja ohjeet 2012. 2011. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D3. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
8. Lämmöneristys ohjeet 2012 Luonnos. 2011. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa C4. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.

9. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaohjeet 2012 luonnos. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D5. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto.
10. Laitinen, Erkki 2011. Uusien rakennusten energiamääräykset 2012. Ympäristöministeriö.
11. Hemmilä, Kari 2010. Ikkunoiden remontointi. VTT.
12. Ylihärsilä, Heikki-Lehtoviita, Timo- Alitalo, Sanna 2004. Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio lämpö.
13. RT 38-10941. 2008. Eristyslasit. Rakennusteollisuus. Helsinki.
14. RT 41-10947. 2009. Puu ja alumiini ikkunat sekä niiden asennus. Rakennusteollisuus. Helsinki.
15. Nieminen, Jyrki 2011. Mikä on passiivitalo. Luentomateriaali VTT.
16. Ikkunoiden energialuokitus. 2011. Saatavissa:
http://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/vaikuta_hankinnoilla/ikkunoiden_ener_gialuokitus. Hakupäivä 10.1.2012.
17. Heikkinen, Jorma 2012. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. Ympäristöministeriö.
18. Comsol multiphysics -ohjelmisto. 2012. The COMSOL Group. Saatavissa:
www.comsol.com. Hakupäivä 5.1.2012.

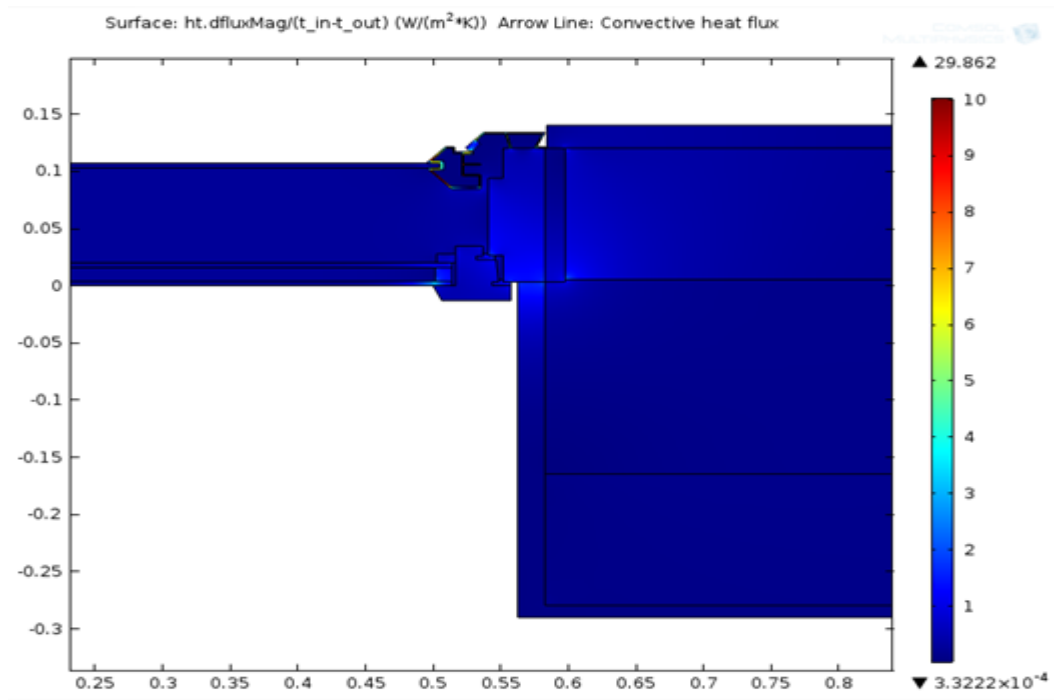
MSE-ikkuna



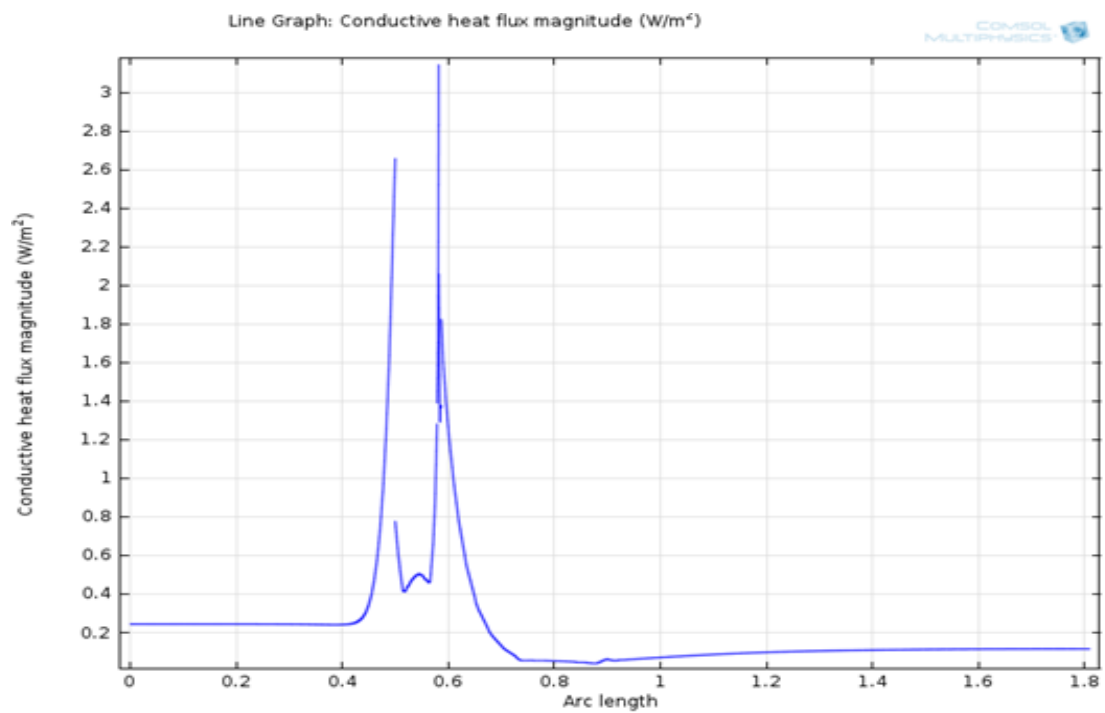
MSE-ikkunaliittymä 1.



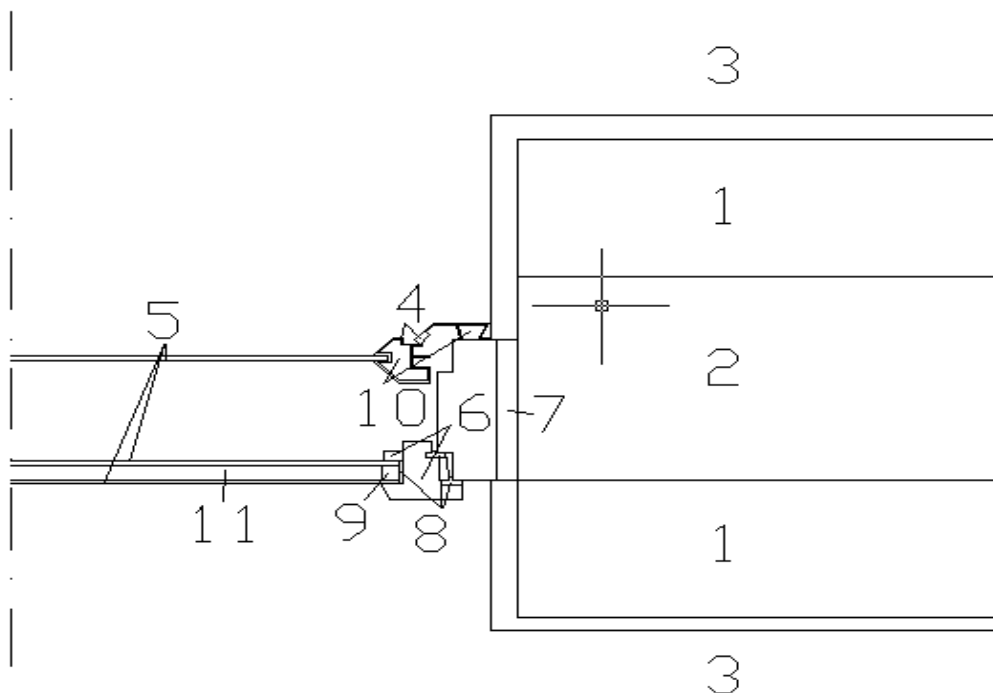
Lämpötilat rakenteessa



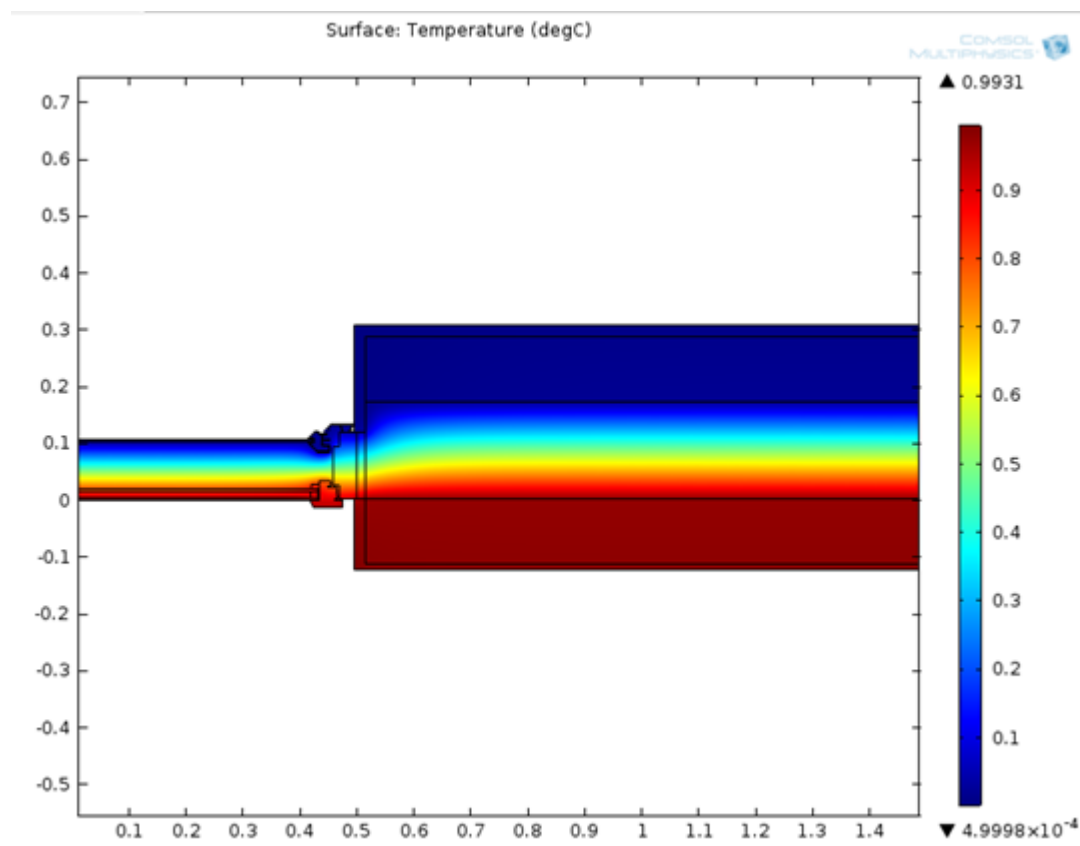
Lämpövirta rakenteessa



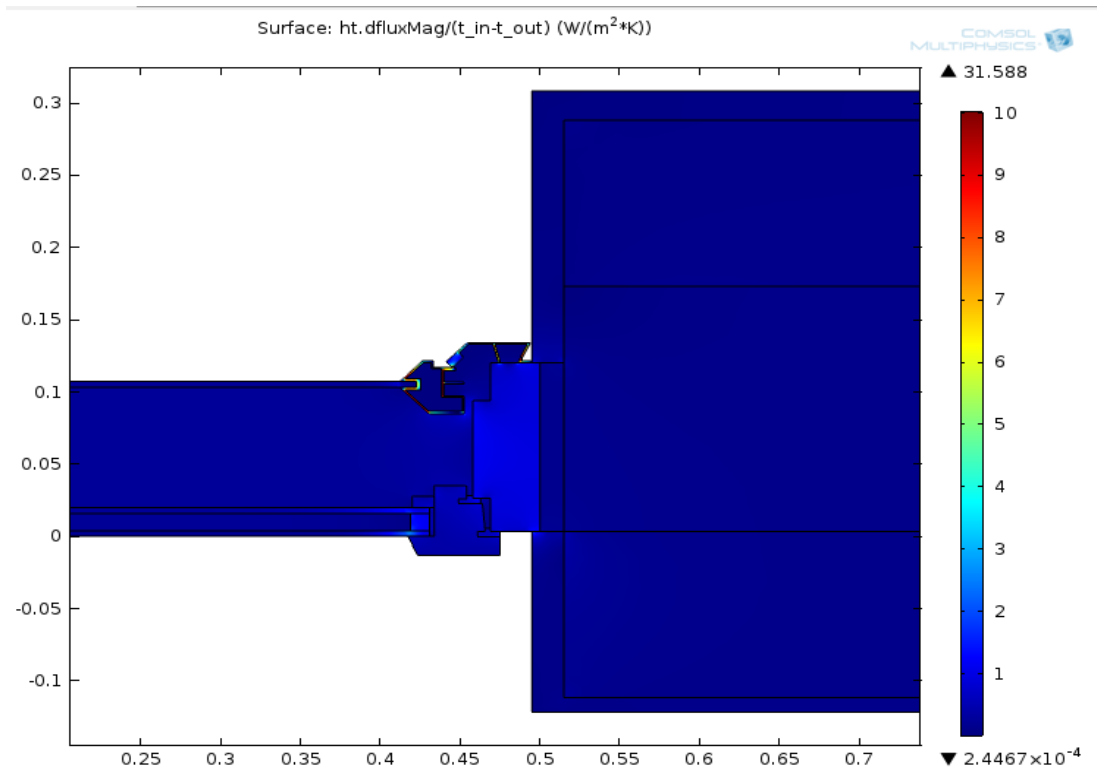
Lämpövirta rakenteessa



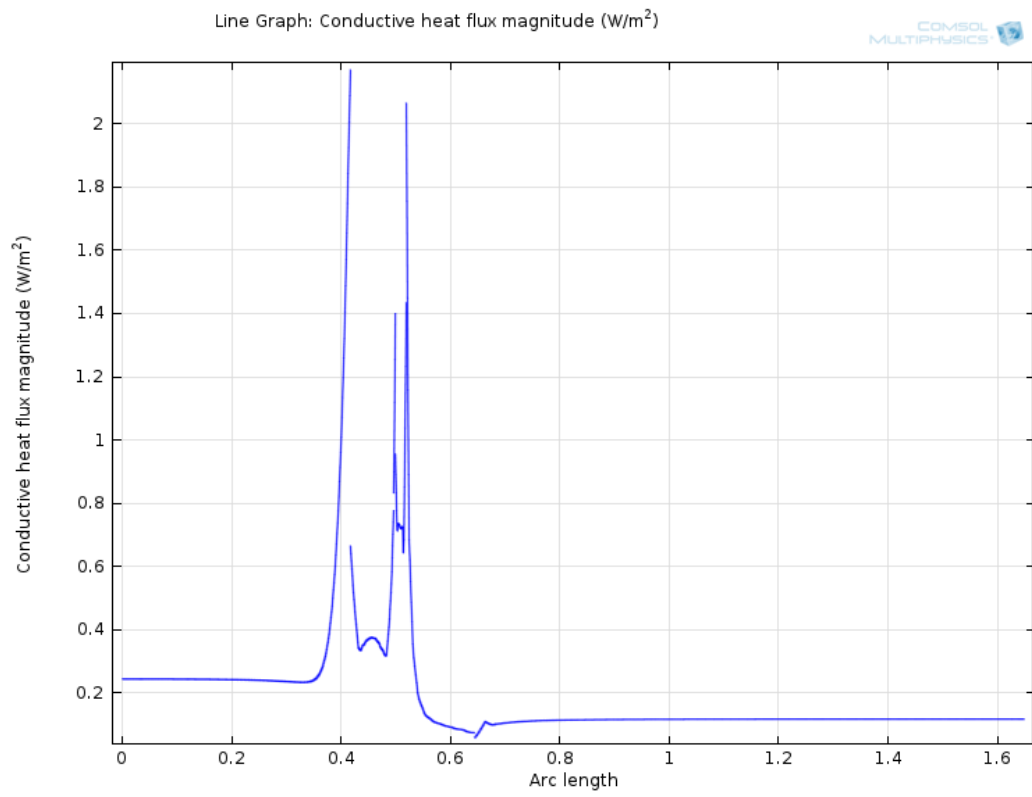
MSE-ikkunaliittymä 2.



Lämpötilat rakenteessa

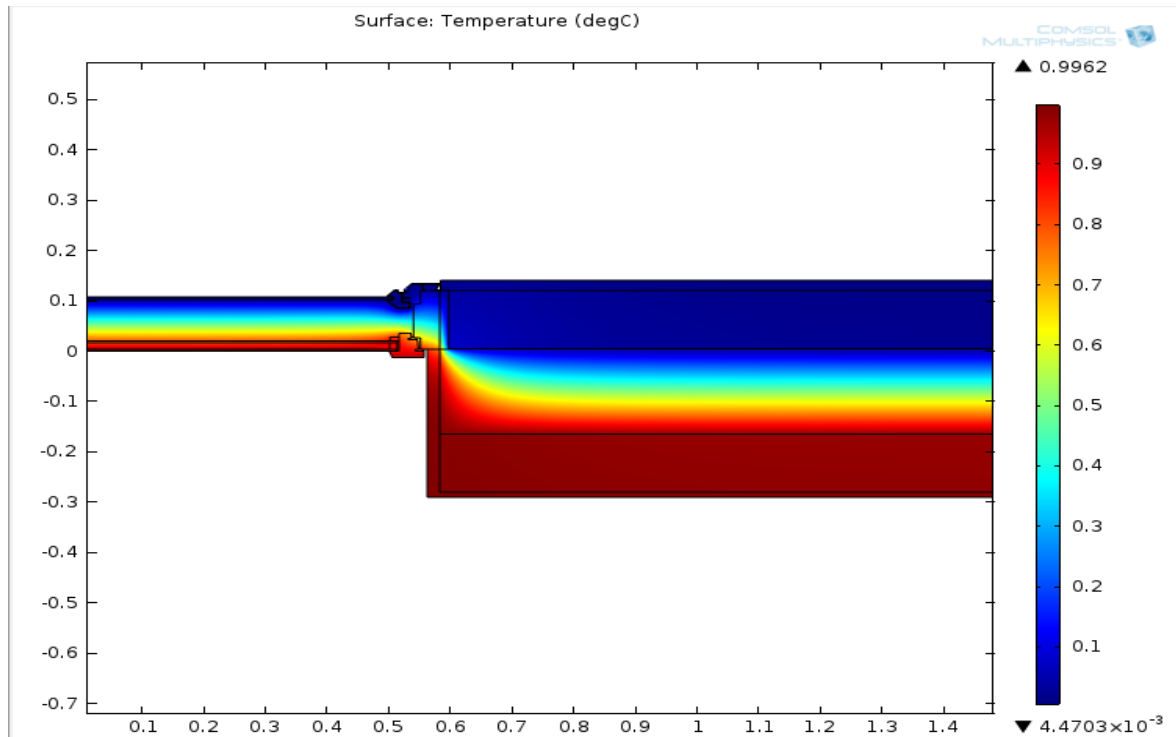


Lämpövirta rakenteessa

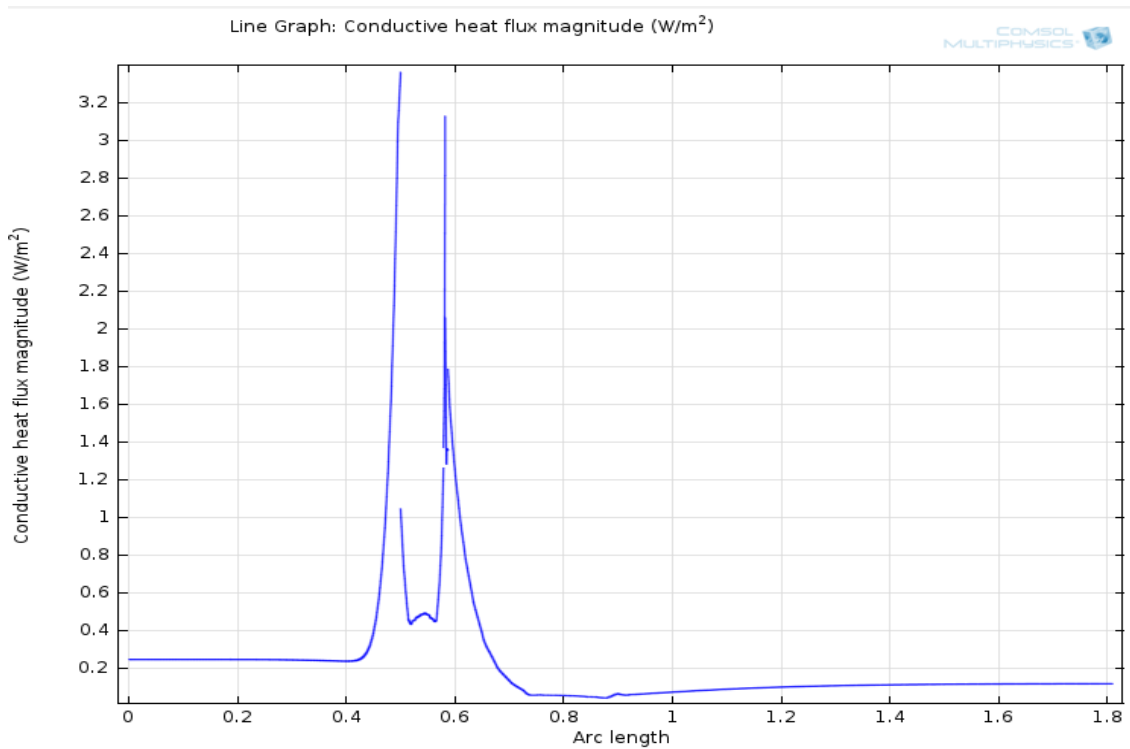


Lämpövirta rakenteessa

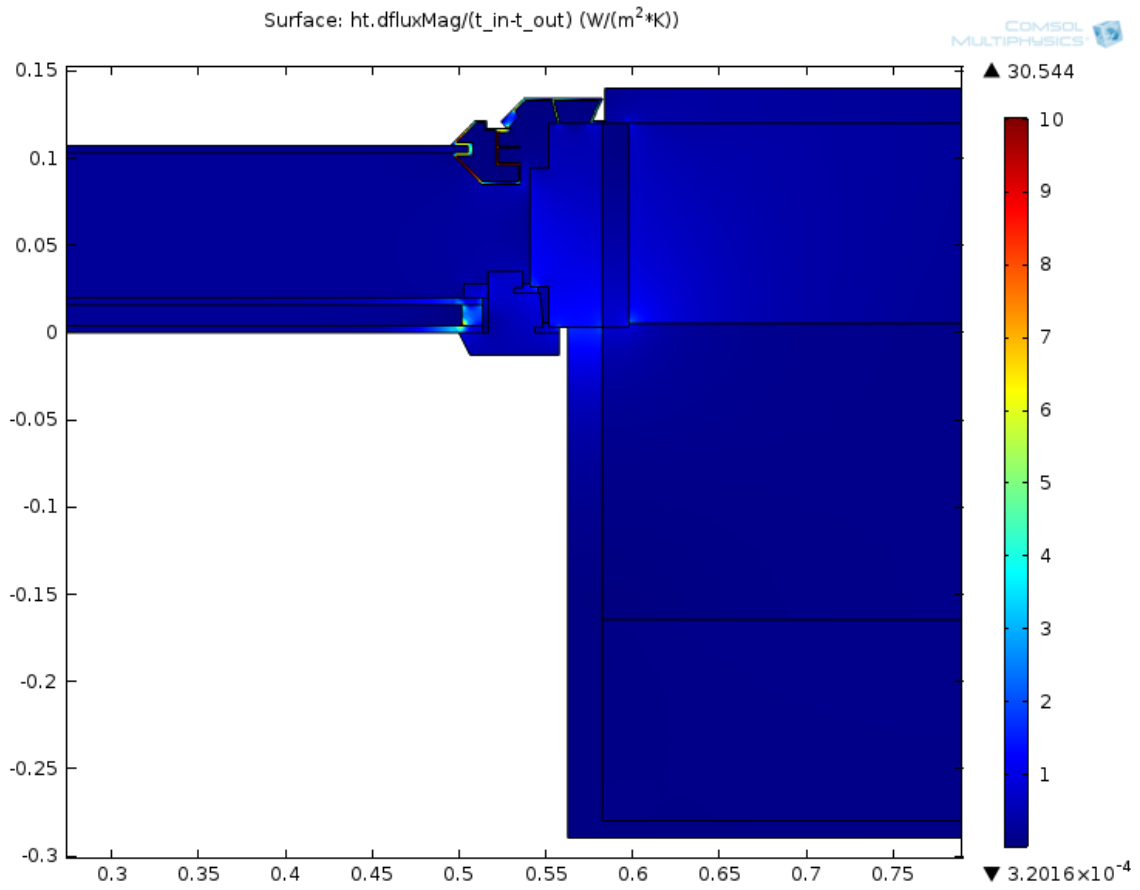
MSE-ikkuna alumiinistalla ja argon täytekaasulla



Lämpötilat rakenteessa

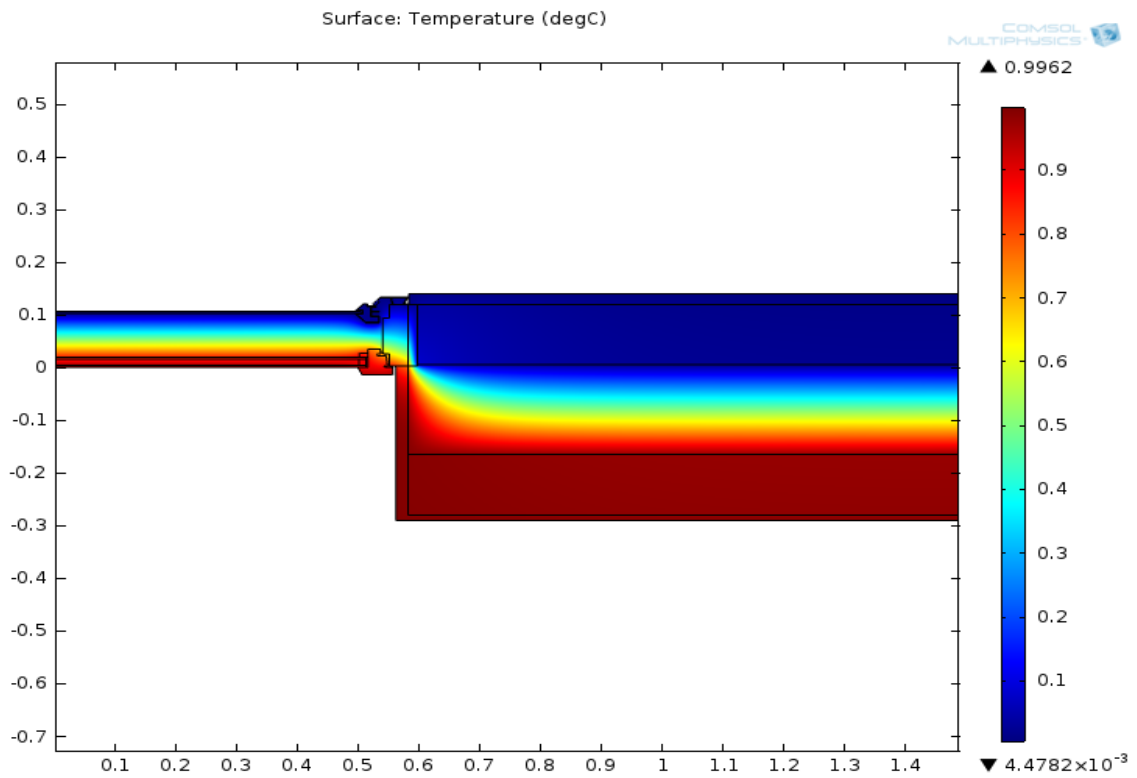


Lämpövirta rakenteessa

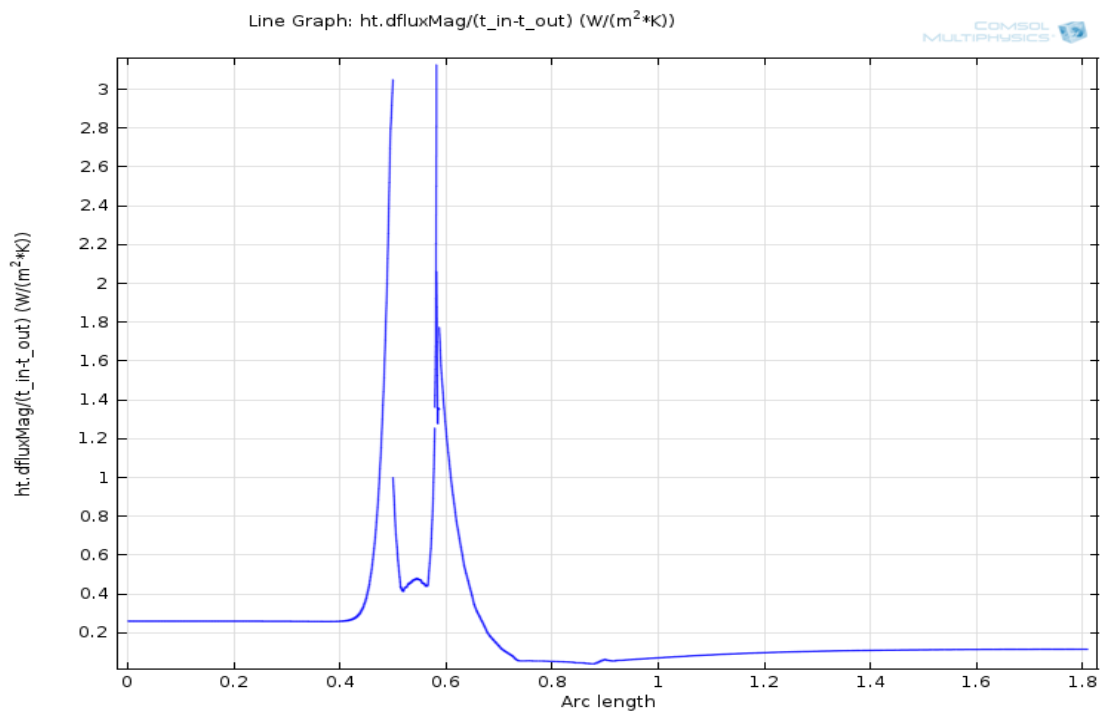


Lämpövirta rakenteessa

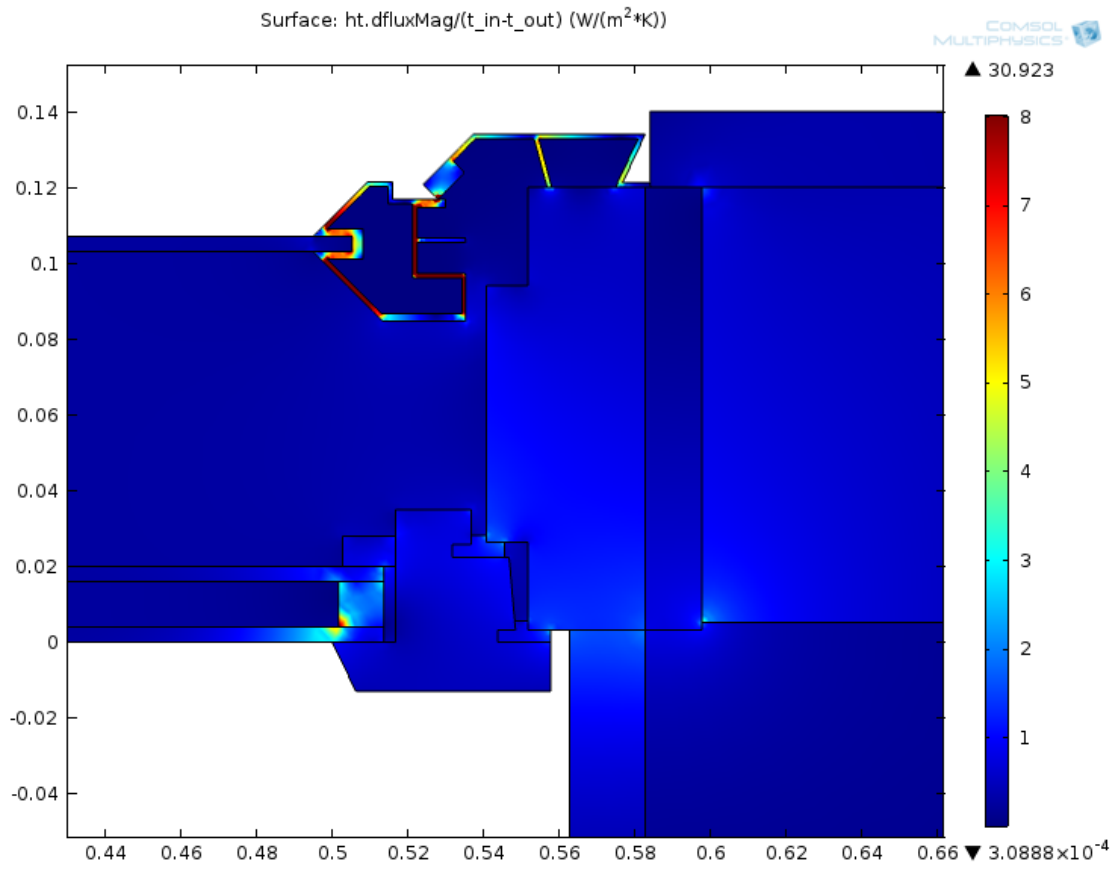
MSE-ikkuna alumiinistalla ja ilma täytekaasuna



Lämpötilat rakenteessa

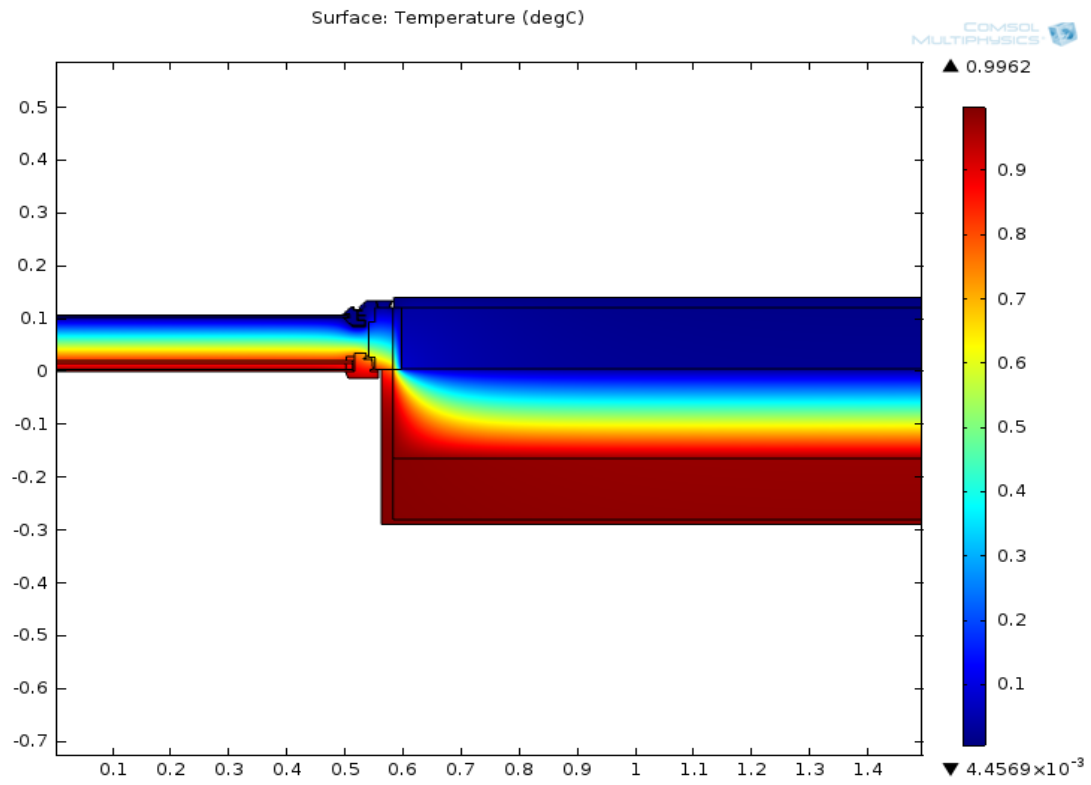


Lämpövirta rakenteessa

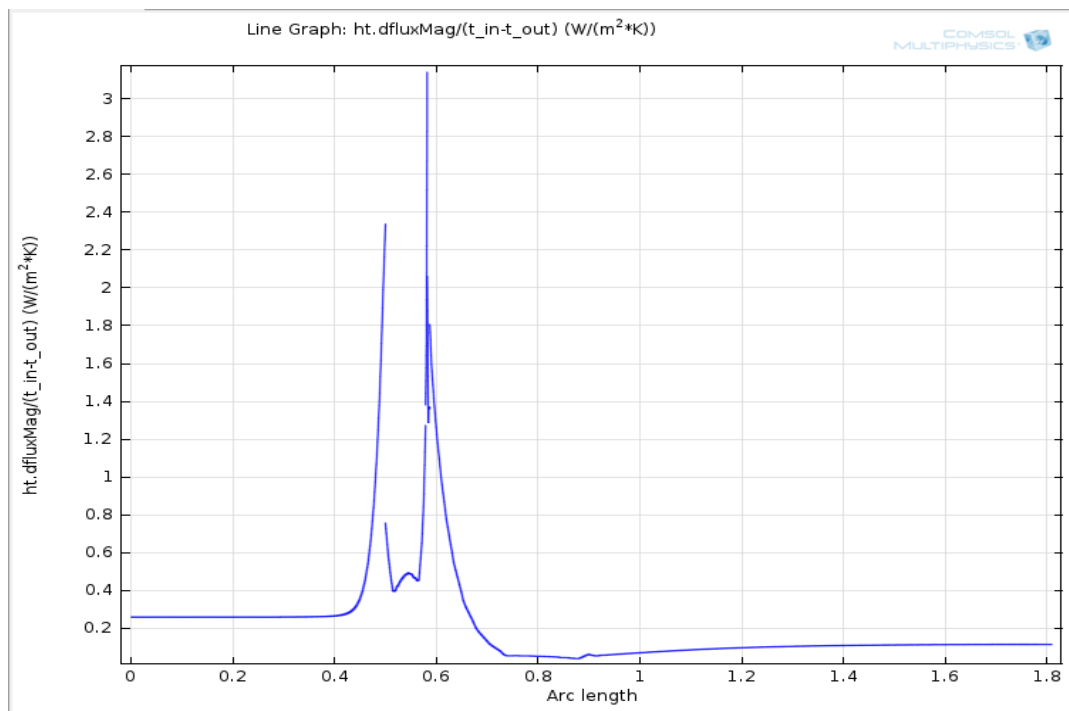


Lämpövirta rakenteessa

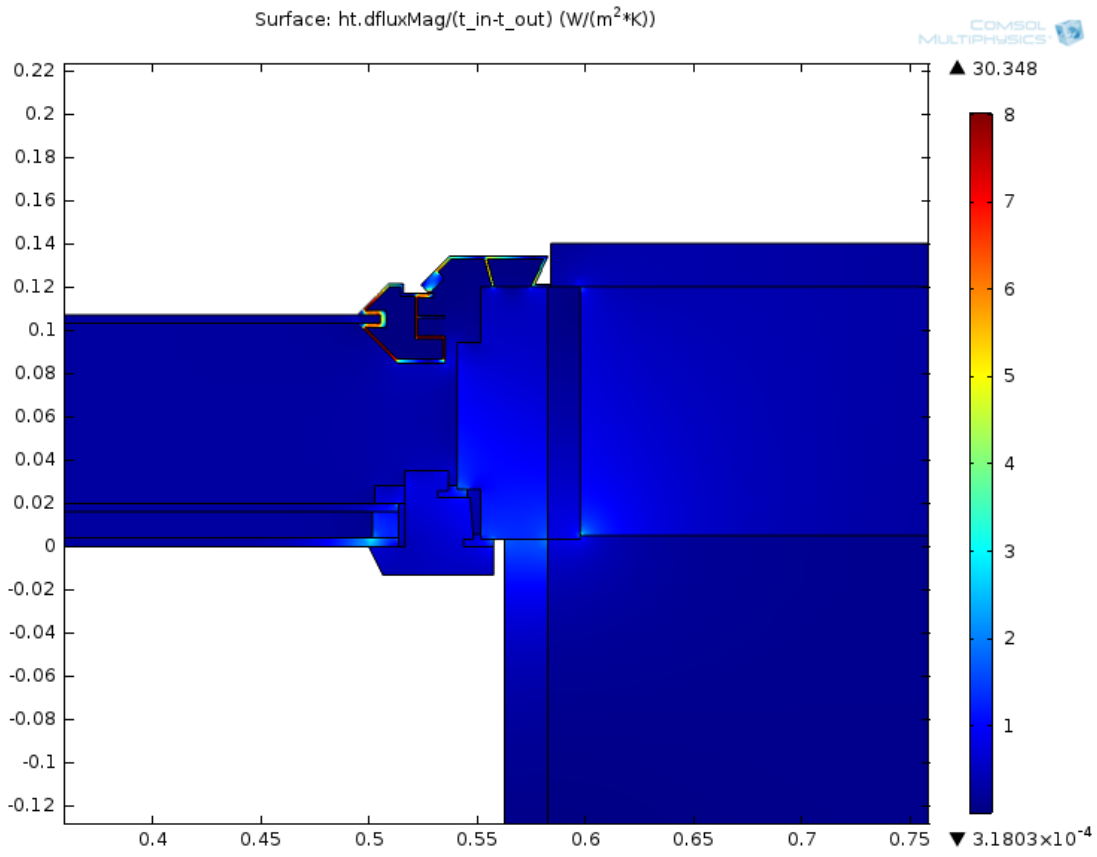
MSE-ikkuna TPS-listalla ja ilma täytekaasuna



Lämpötilat rakenteessa

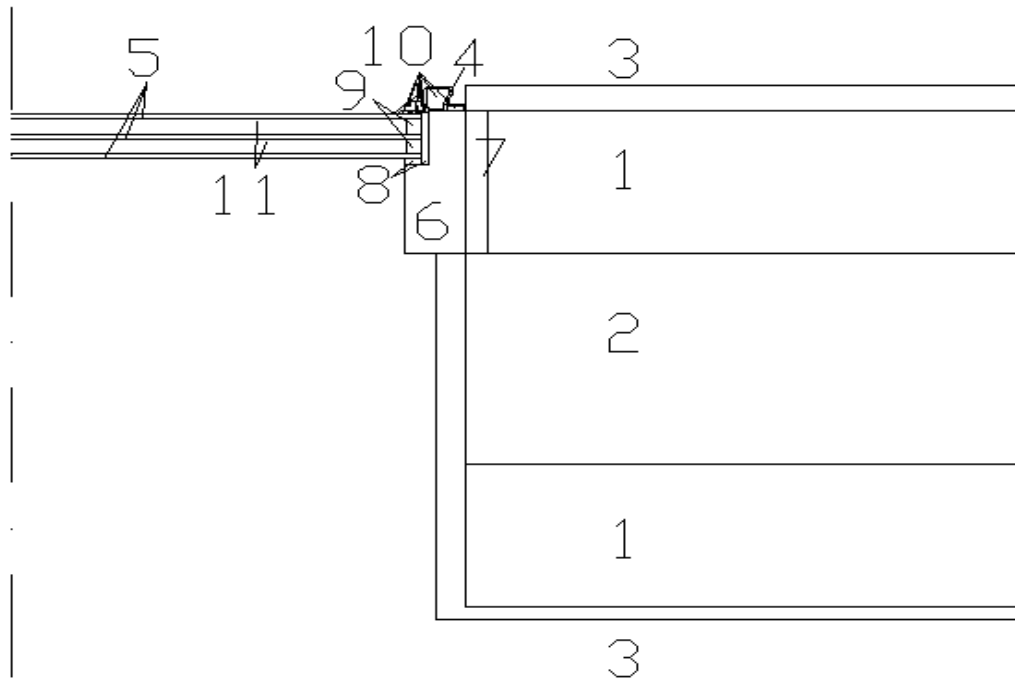


Lämpövirta rakenteessa

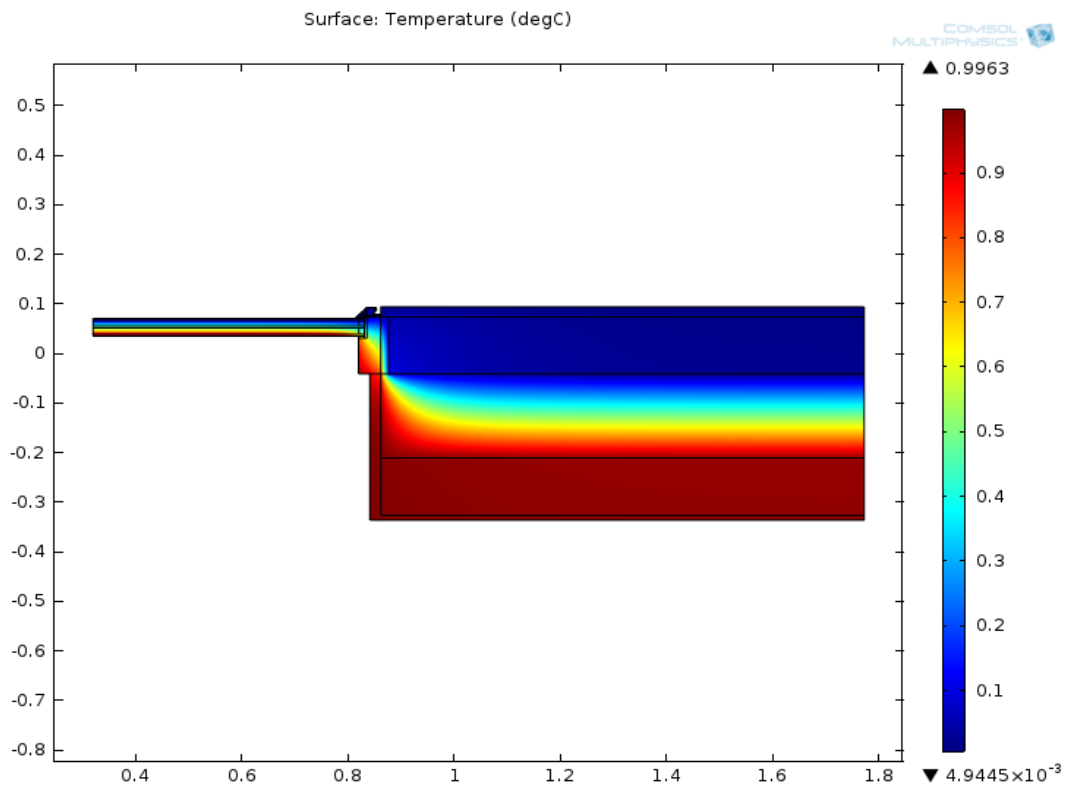


Lämpövirta rakenteessa

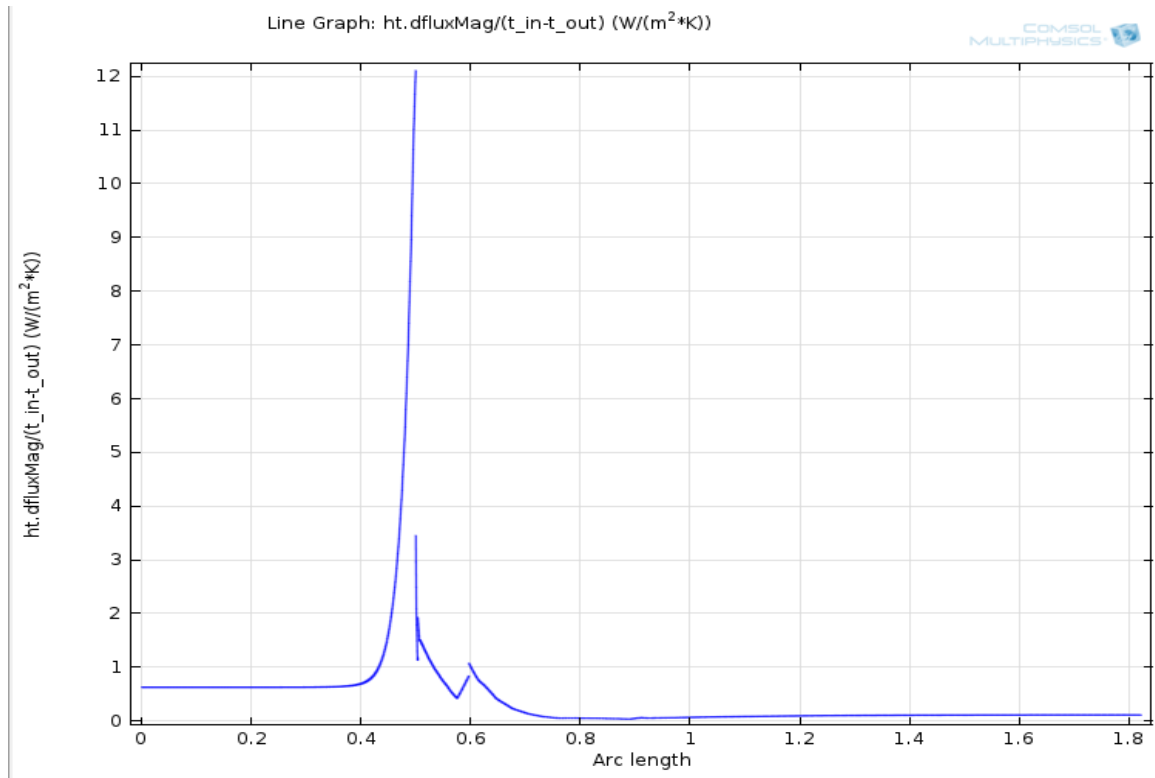
MEK-ikkuna



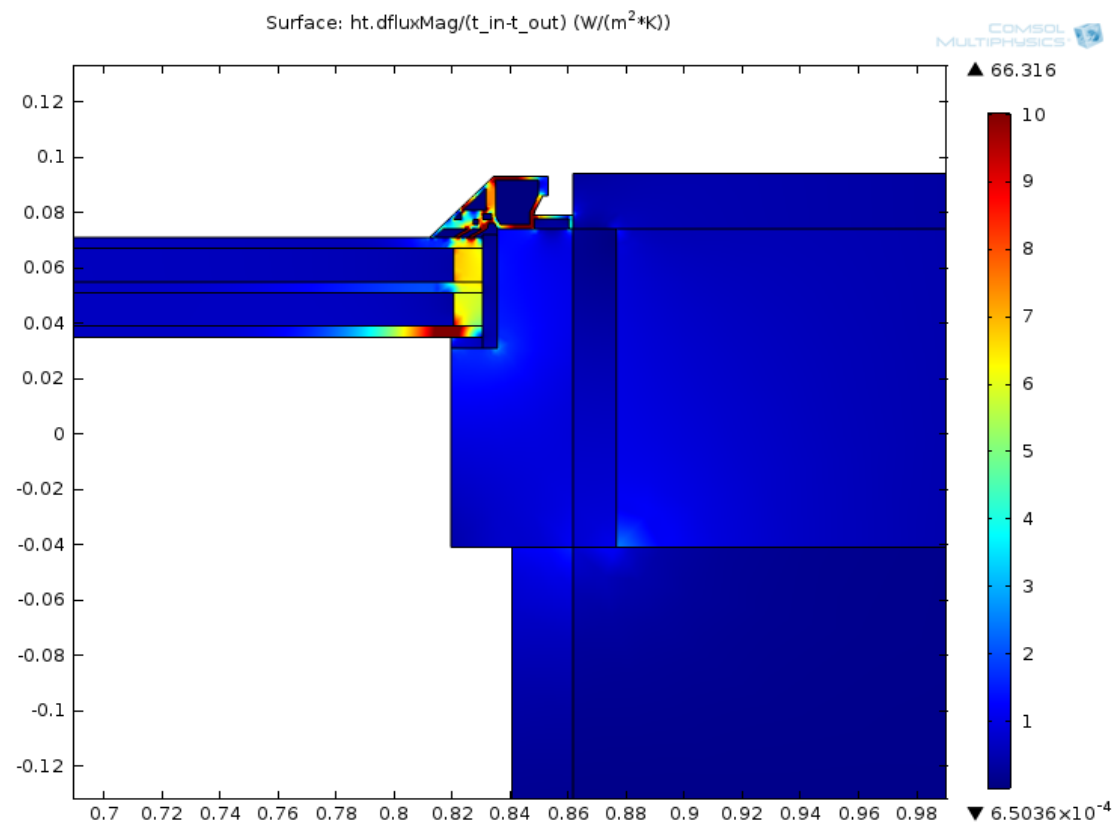
MEK-ikkunarakenne 1.



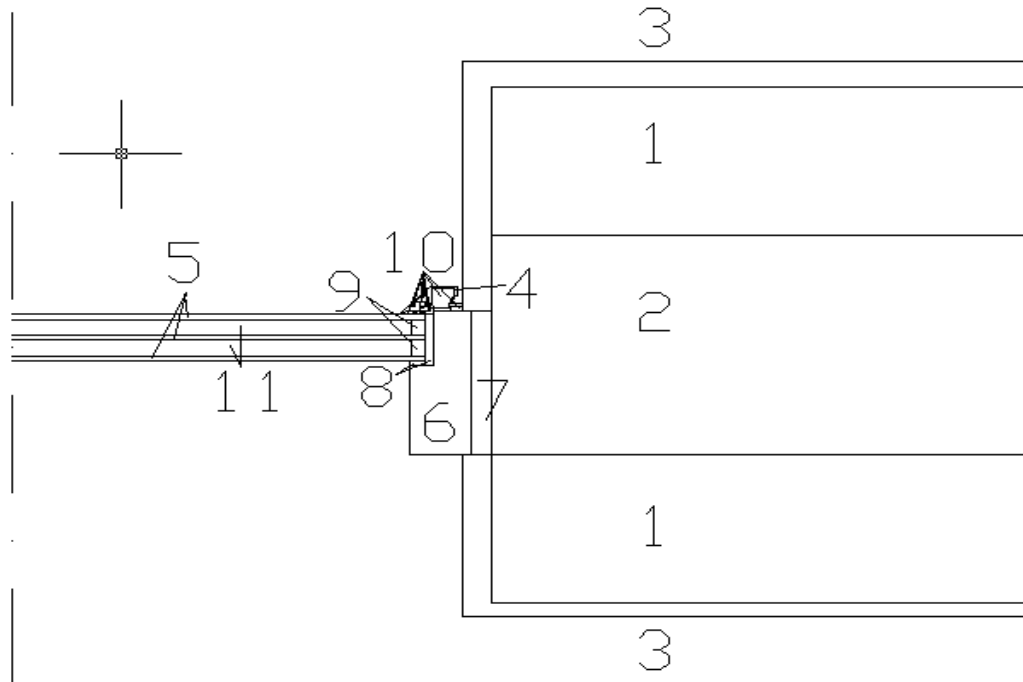
Lämpötilat ikkunarakenteessa



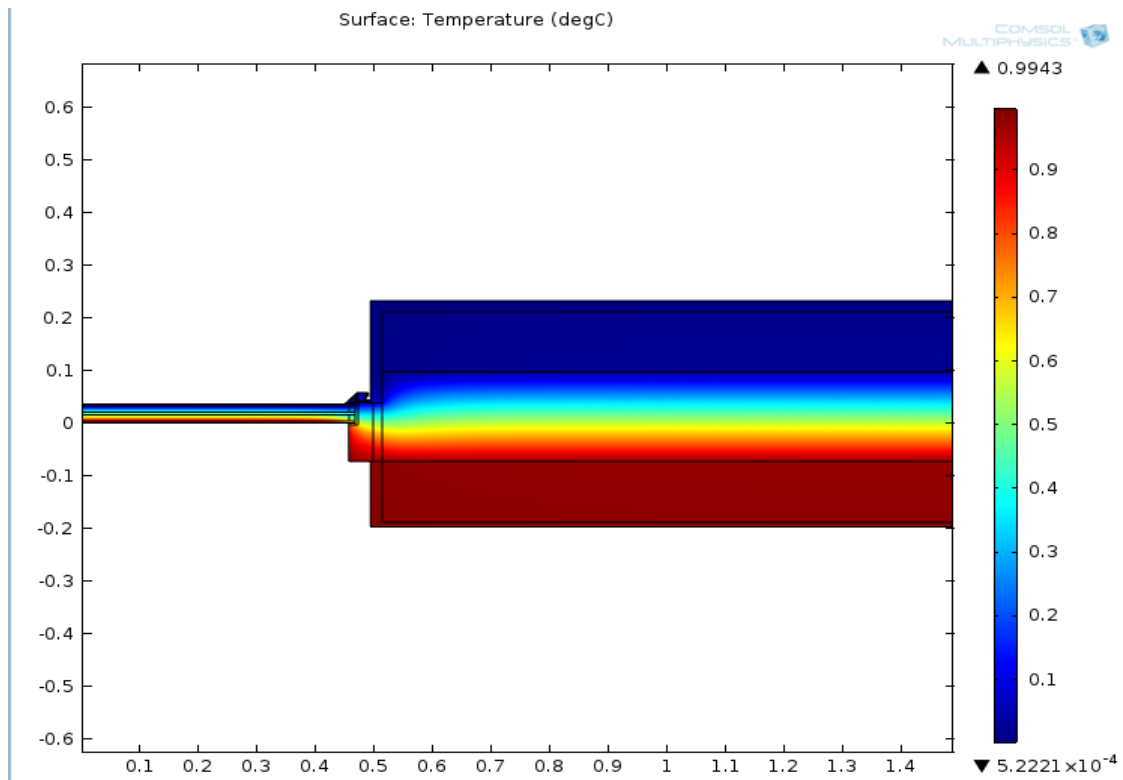
lämpövirrat ikkunarakenteessa



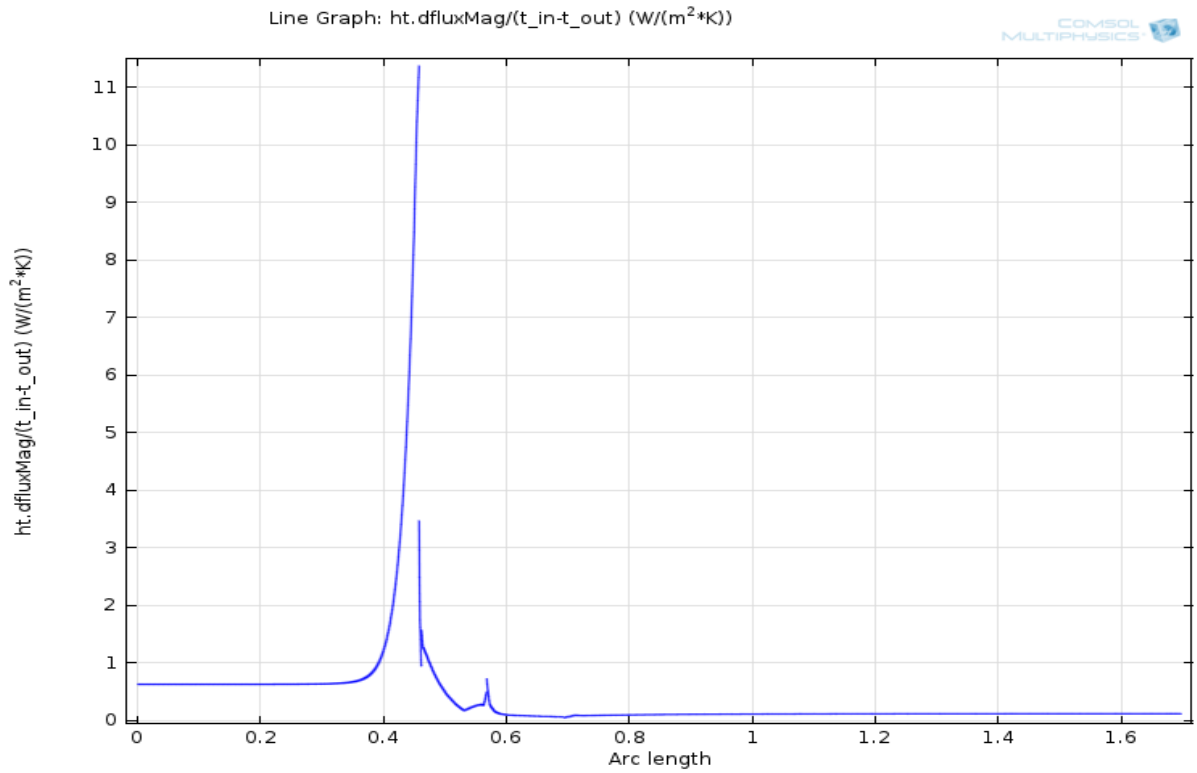
lämpövirrat ikkunarakenteessa



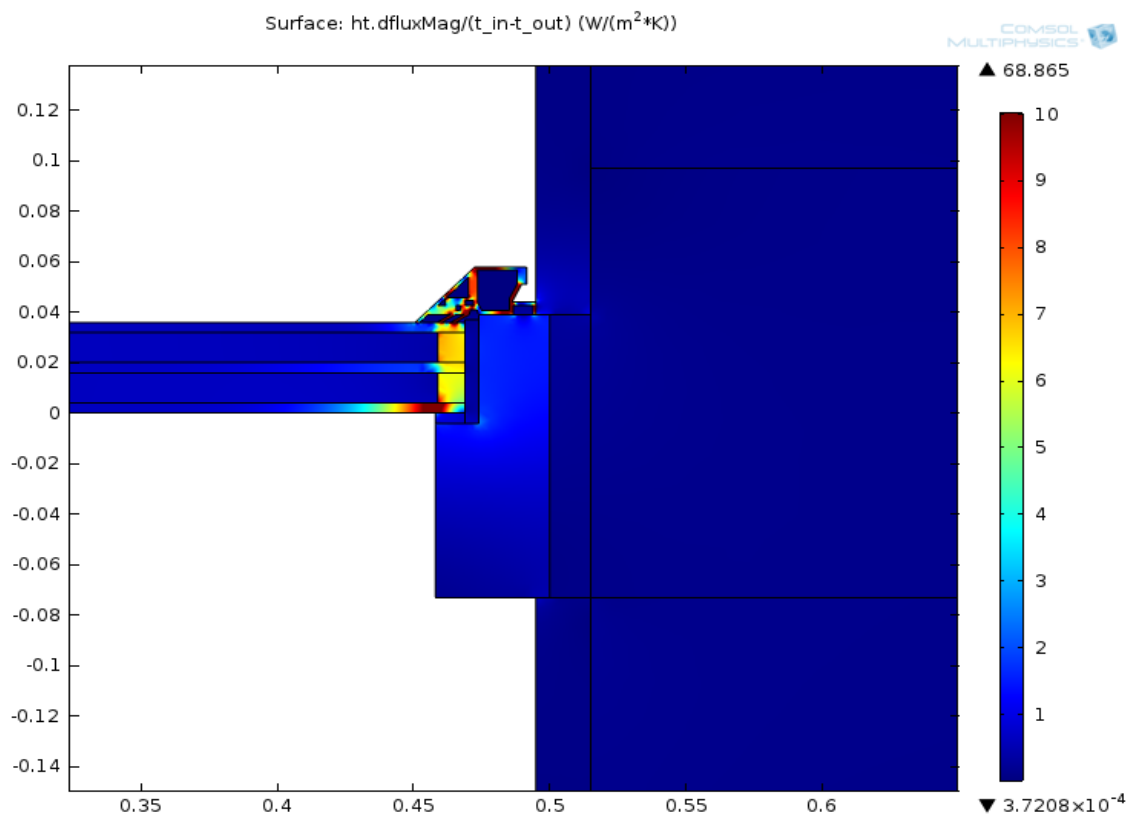
MEK-ikkunarakenne 2



Lämpötilat ikkunarakenteessa

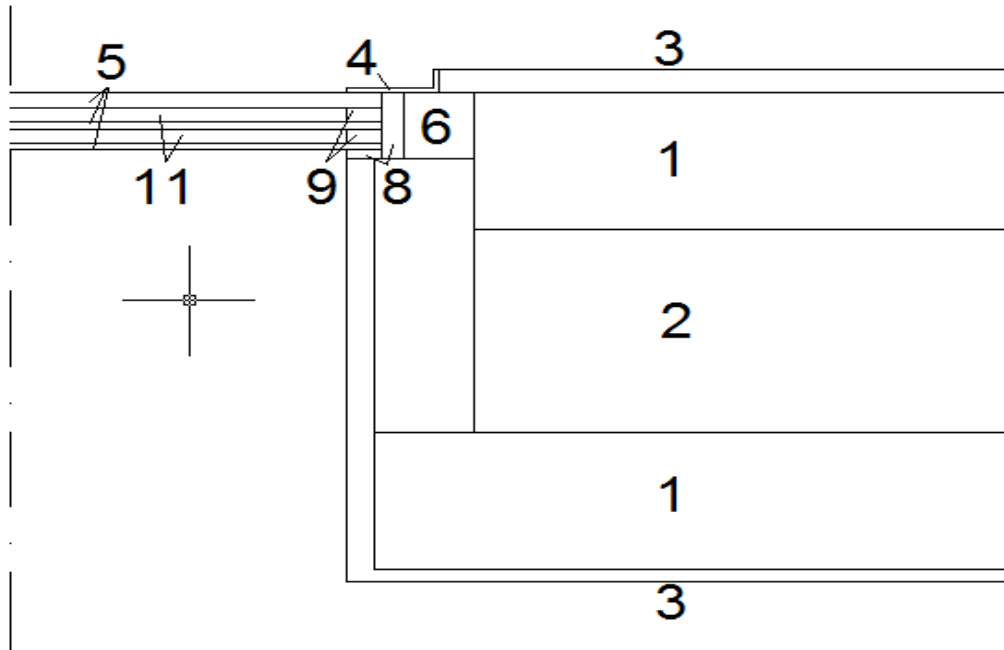


Lämpövirrat ikkunarakenteessa

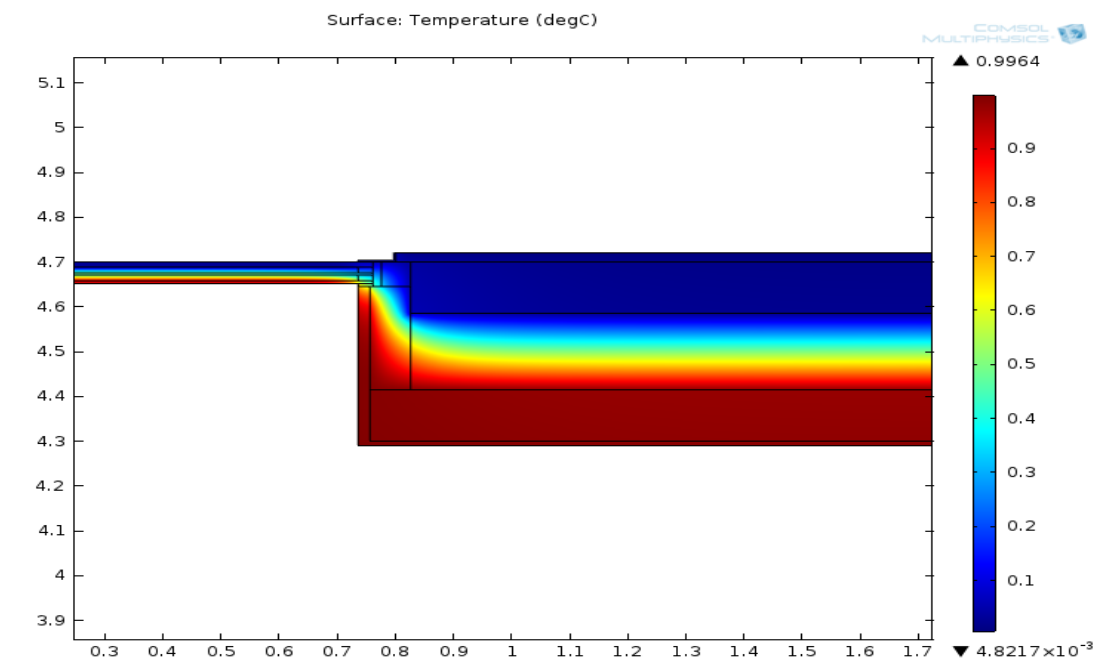


Lämpövirrat ikkunarakenteessa

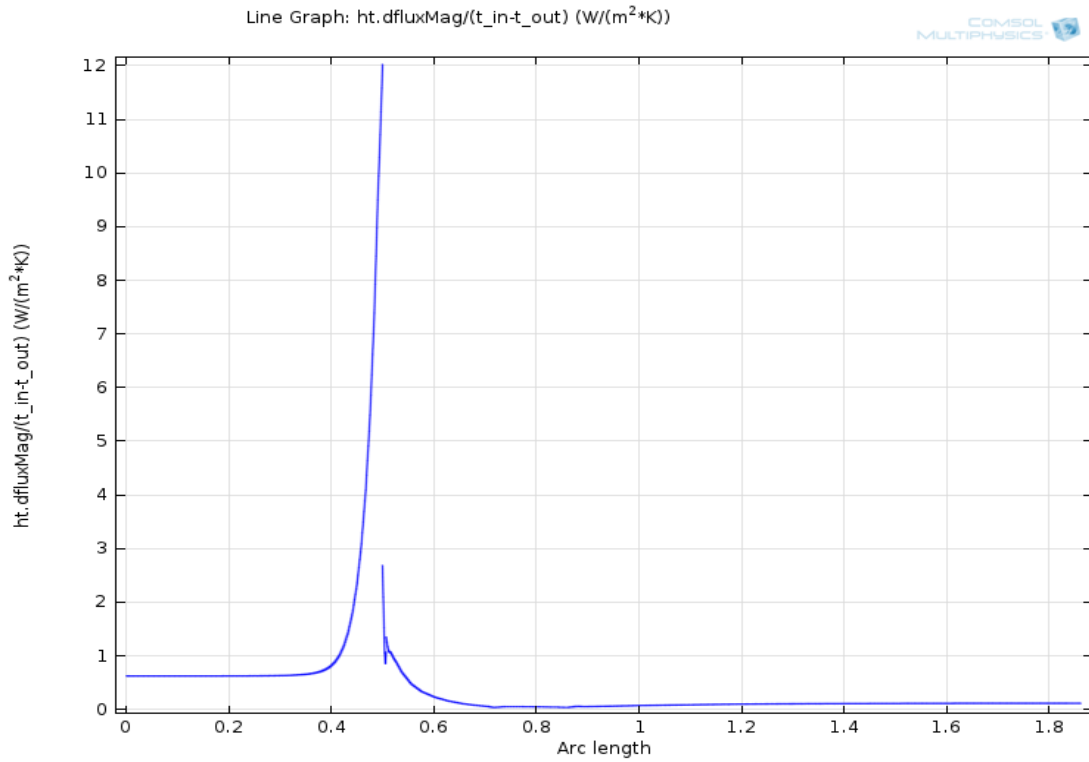
Ikkunaelementti



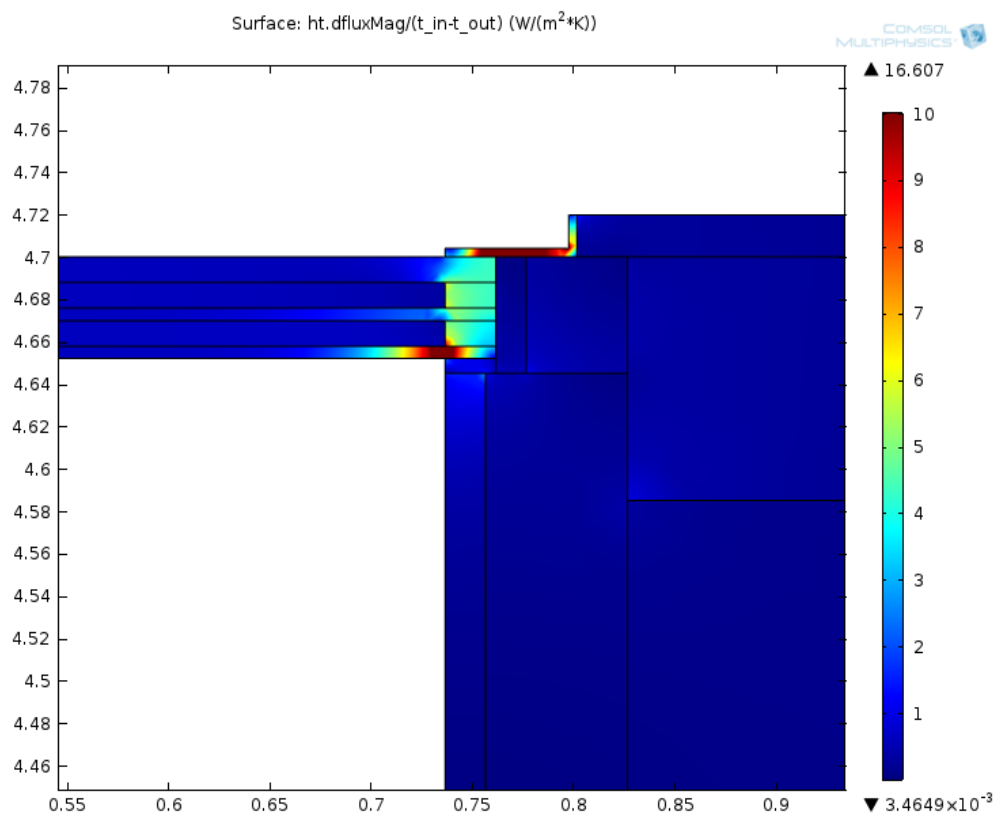
Ikkunaelementtirakenne 1



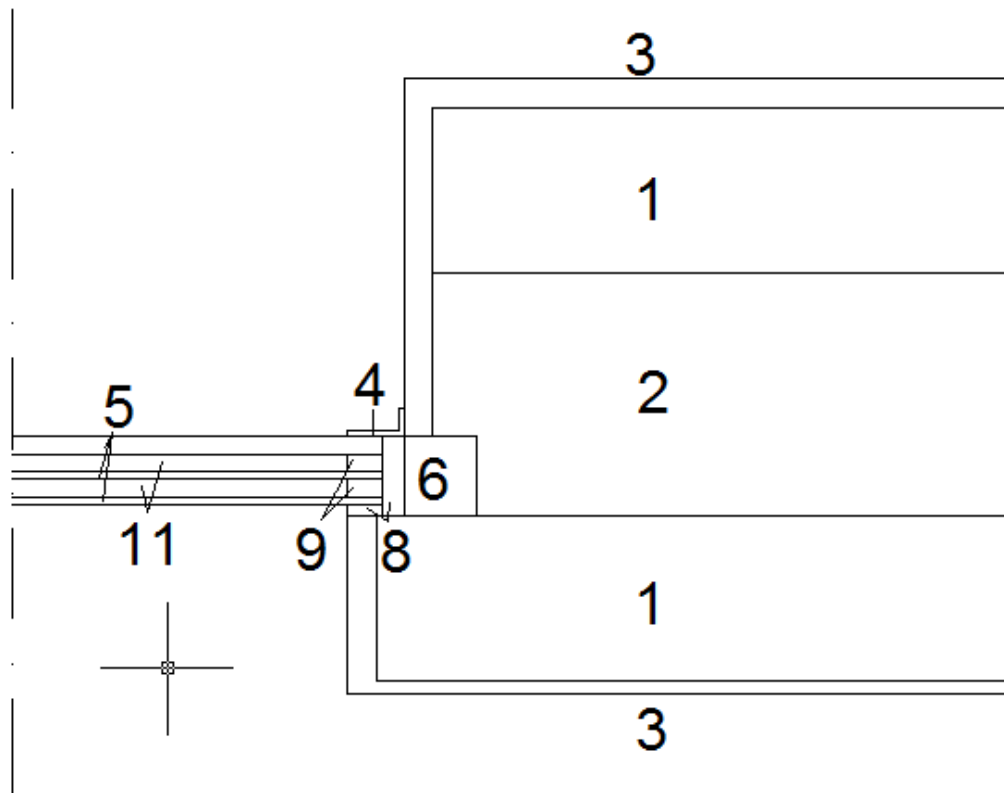
Lämpötilat rakenteessa



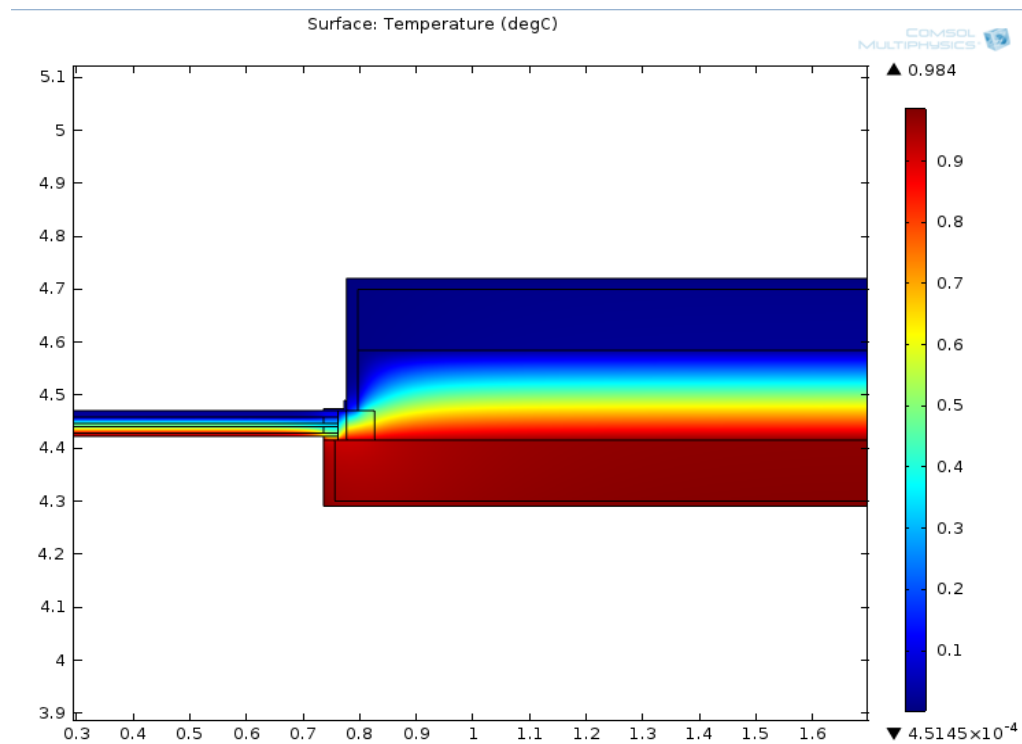
Lämpövirrat rakenteessa



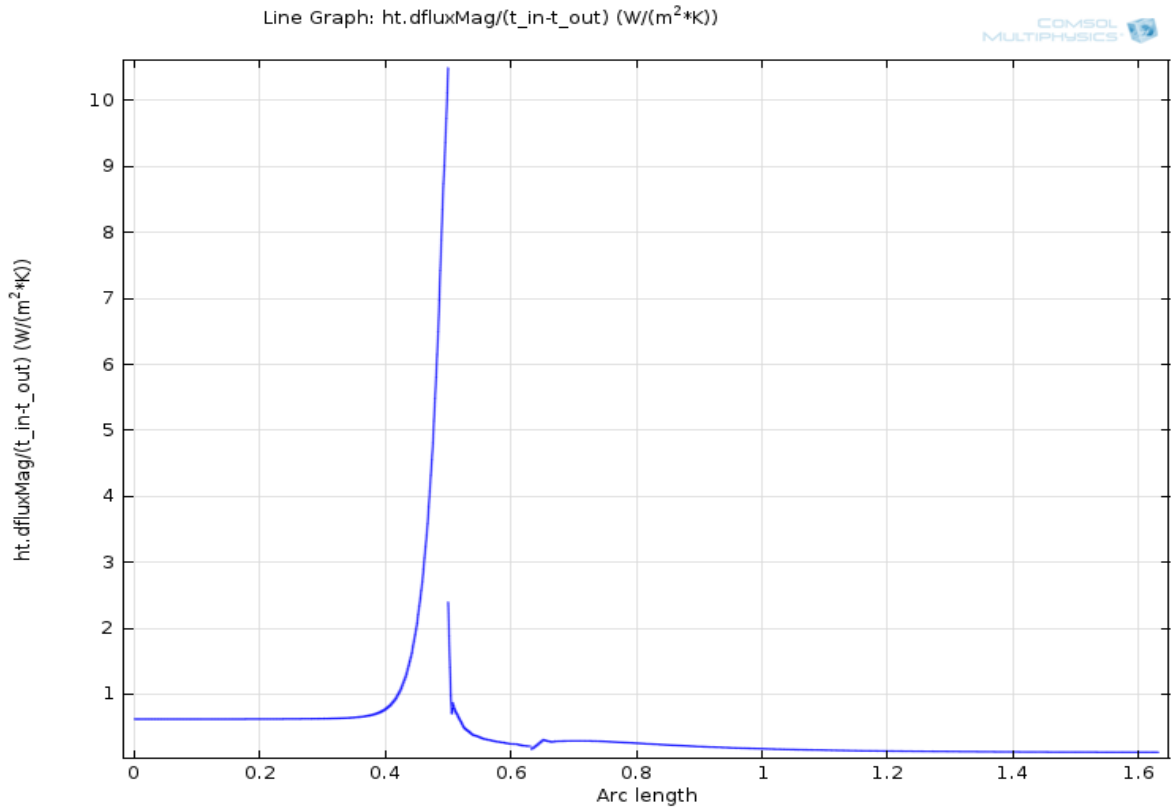
Lämpövirrat rakenteessa



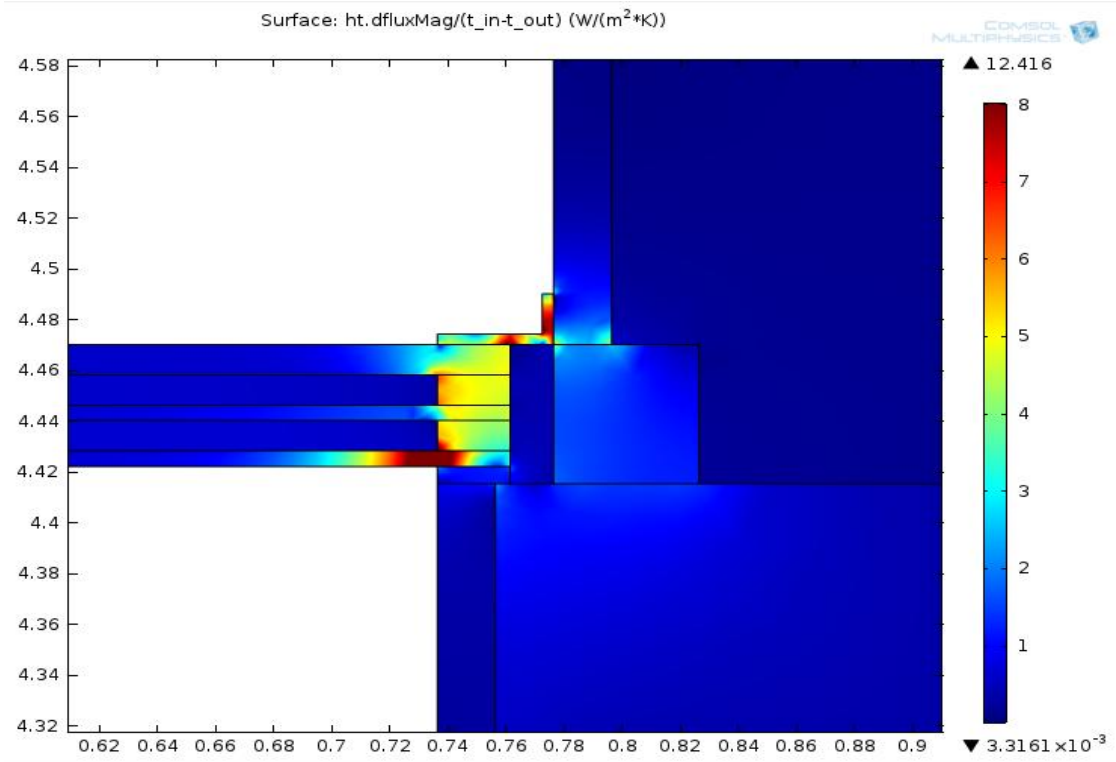
Ikkunaelementtirakenne 2



Lämpötilat rakenteessa



Lämpövirrat rakenteessa



Lämpövirrat rakenteessa