

Rasmus Törrönen

IKKUNOIDEN U-ARVOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Eero Tuominen
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Rasmus Törrönen: Ikkunoiden U-arvoon vaikuttavat tekijät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Toukokuu 2021

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selvittää, millä eri keinoilla voidaan pienentää ikkunan U-arvoa. Lisäksi työssä perehdytään ikkunan U-arvon laskennalliseen määrittämiseen ja U-arvoa koskeviin määräyksiin Suomessa. Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena ja aineistona on käytetty alan kirjallisuutta, tieteellisiä artikkeleita, SFS-standardeja, RT-kortistoa, Ympäristöministeriön asetuksia sekä ikkunanvalmistajien verkkosivuja.

Ikkunat ovat rakennuksen vaipan rakenneosista lämmöneristävyydeltään selvästi heikoimpia, minkä vuoksi niillä on suuri merkitys rakennuksen energiankulutuksessa. Viime vuosikymmenten aikana kiristyneiden U-arvovaatimusten vuoksi markkinoille on ilmestynyt toinen toistaan energiatehokkaampia ikkunarakenteita, joiden avulla pyritään parantamaan rakennuksen energiatehokkuutta.

Työn alussa esitellään erilaisia ikkunarakenteita ja perehdytään ikkunan lämpötekniiseen toimintaan. Työn laskentaosio pohjautuu standardeihin SFS-EN ISO 10077-1, SFS-EN ISO 10077-2, sekä Suomen rakentamismääräyskokoelman osaan C4. Tämän jälkeen keskitytään lämmöneristävyiden kannalta olennaisiin lasityyppeihin ja rakenneratkaisuihin. Lisäksi selvitetään erilaisten rakenteiden ja rakenneosien vaikutusta ikkunan U-arvoon.

Tutkimustyön tuloksista voidaan huomata, että ikkunan U-arvoon vaikuttaa monta tekijää. Parhaimmaksi keinoksi U-arvon pienentämiseksi osoittautui lasien lukumäärän kasvattaminen, ja varsinkin eristyslasilla on suuri vaikutus ikkunan lämmöneristävyyteen. Tämän lisäksi myös ikkunan tiivistämisellä ja sälekaihtimilla huomattiin olevan vaikutusta ikkunan U-arvoon. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että suurin parannus ikkunan U-arvoon saavutetaan monen eri tekijän yhteisvaikutuksen avulla.

Avainsanat: U-arvo, eristyslasi, selektiivilasi, täytekaasut

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. IKKUNAT SUOMESSA	3
2.1 Ikkunan rakenne	3
2.2 Ikkunatyypit	4
3. IKKUNAN RAKENNUSFYSIKKA	6
3.1 Lämmön siirtyminen ikkunassa	6
3.2 Rakennusosan U-arvo	7
3.3 Kylmäsilat	9
4. IKKUNAN U-ARVO	10
4.1 U-arvon laskennallinen määrittäminen ikkunalle	10
4.2 Ikkunan U-arvovaatimukset	11
5. IKKUNAN U-ARVOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	14
5.1 Lasiosa	14
5.2 Selektiivilasi	15
5.3 Eristyslasi	16
5.4 Eristyslasin täytekaasut	18
5.5 Tyhjiölasi	20
5.6 Tiivisteet	21
5.7 Sälekaihtimet	23
5.8 Yhteenveto	24
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	28
LÄHTEET	29

1. JOHDANTO

Ikkunat ovat yleisiä rakennusosia ja niitä käytetäänkin lähes jokaisessa rakennuksessa. Sen lisäksi, että ikkunat tuovat sisätiloihin viihtyvyyttä, niillä on myös muita tärkeitä ominaisuuksia. Ikkuna päästää rakennuksen sisään valoa, suojaa säältä, tarjoaa tuuletusmahdollisuuden sekä eristää ääntä ja lämpöä (Mikkola & Böök 2011, s. 17). Ikkuna myös mahdollistaa yhteyden ympäristöön, mikä koetaan tärkeäksi terveydelle ja hyvinvoinnille (Hemmilä & Saarni 2001, s. 6). Yksi ikkunan olennainen ominaisuus on sen lämmöneristävyyys, joka vaikuttaa osaltaan rakennuksen energiatehokkuuteen. Uusista rakennuksista halutaan tehdä mahdollisimman energiatehokkaita ja siksi viime vuosikymmenten aikana on alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota ikkunoiden lämmönläpäisykerroimen arvoon.

Ikkunan energiatehokkuus koostuu kolmesta eri tekijästä: ikkunan läpi johtuvasta lämpöenergian määrästä, ikkunan läpi tulevasta auringonsäteilyn määrästä ja ikkunan ilmatiiviydestä. Näitä tekijöitä kuvaavat U-arvo, g-arvo ja L-arvo. Kaikista rakennuksen vaihtopaneeliosista ikkuna eristää lämpöä huoneen. Ikkuna on myös merkittävä lämpöhäviön lähde. Rakennuksen lämmitysenergian kulutusta voidaan pienentää parantamalla ikkunarakenteiden lämmöneristävyyttä. Jos siis halutaan vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen, jo pelkällä ikkunan valinnalla on suuri merkitys. Tämä pätee erityisesti korjausrakentamisessa, jolloin vanhojen ikkunoiden ominaisuuksia parantamalla voidaan suhteellisen pienellä investoinnilla vaikuttaa koko rakennuksen energian kuluutukseen.

Eri maat ovat asettaneet ikkunoiden U-arvoille omat vaatimuksensa. Tässä työssä keskitytään ikkunan lämpötekniiseen toimintaan ja ikkunoiden U-arvovaatimukseen Suomessa. Erilaiset sääolosuhteet vaativat ikkunoilta erilaisia ominaisuuksia. Talvikauden aikaan ikkunalta vaaditaan hyvää lämmöneristyskykyä, jotta sisäilma pysyy miellyttävän lämpimänä. Toisaalta kesällä toivotaan, ettei auringon lämpösäteily lämmitä huoneita liiaksi. On olemassa paljon erilaisia ikkunatyyppejä, mutta tässä työssä keskitytään Suomessa käytössä oleviin ikkunatyyppeihin. Työn tavoitteena on selvittää mitkä tekijät muodostavat ikkunan U-arvon ja millä keinoilla U-arvon suuruuteen pystytään vaikuttamaan.

Työ suoritetaan kirjallisuustutkimuksena ja työn alussa käsitellään lyhyesti ikkunan eri osat ja niiden tehtävät, sekä esitellään Suomessa käytössä olevat ikkunatyypit. Toimiakseen oikein ikkunan rakenneosien valmistuksessa ja niiden asentamisessa vaaditaan erityistä tarkkuutta. Ikkunat luokitellaan niiden lasien ja puitteiden lukumäärän mukaan ikkunatyyppeihin. Tässä kohtaa työtä käydään läpi myös ikkunatyypien tyyppiirrookset ja tyyppinimikkeet.

Seuraavaksi siirrytään teoriaosioon, joka käsittelee ikkunan lämpöteknistä toimintaa ja sen taustoja. On tärkeää tiedostaa lämmön siirtymismuodot ja -reitit ikkunan läpi, jotta voidaan tarkastella ikkunan lämmöneristyskykyä ja näin myös ikkunan lämmönläpäisykertoimeen vaikuttavia tekijöitä. Osiossa käydään läpi myös U-arvon teoriaa.

Teoriaosion jälkeen työssä perehdytään ikkunan U-arvon määrittämiseen laskennallisesti. Tämän lisäksi esitellään asetetut U-arvovaatimukset Suomessa ja käydään läpi laskentakaavat, joiden avulla saadaan määritettyä ikkunan lämmönläpäisykerroin. U-arvovaatimukset asettavat ikkunalle tavoitteen, johon tulee pyrkiä erilaisin materiaalivalinnoin ja rakentein. Vaatimukset koskevat vain uudisrakentamista. Korjausrakentamisessa vanhoja ikkunoita ei tarvitse uusia, vaan niiden lämmönläpäisykertoimen arvoa tulee parantaa niin paljon kuin mahdollista.

Tämän jälkeen edetään työn viimeiseen osioon, jossa käydään läpi millä tavoin ikkunoiden U-arvon suuruuteen pystytään vaikuttamaan. Nämä keinot esitellään omilla alaluvuissaan ja vaikutuksia havainnollistetaan erilaisten kuvaajien avulla. Työn lopuksi koostaan yhteen tärkeimmät havainnot.

2. IKKUNAT SUOMESSA

Suomessa käytetyt ikkunat poikkeavat rakenteeltaan muualla Euroopassa käytetyistä ikkunoista. Esimerkiksi Keski-Euroopassa ikkunat ovat tavallisesti avattavia yksipuitteisia ikkunoita tai kiinteitä eristyslasi-ikkunoita. Ruotsissa käytetään myös kaksipuitteisia ikkunoita, mutta niiden puitteet on yleensä kytketty toisiinsa. (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 9) Suomessa ikkunat ovat enimmäkseen kaksi- ja kolmilasisia avattavia ikkunoita, joiden puitteet avautuvat erikseen. Suomalaiset seinän paksuiset lämmöneristeet sekä ikkunan kolme lasia saavat aikaan sen, että suomalaisten ikkunoiden karmisyvyys on eurooppalaisia ikkunoita suurempi. (Hemmilä & Heimonen 2005, s. 8)

2.1 Ikkunan rakenne

Vaikka ikkuna näyttääkin päällepäin kovin yksinkertaiselta rakennusosalta, on sen rakenne yllättävän monimutkainen. Ikkuna on kokonaisuus, joka voidaan jakaa valoaukkoon ja ikkunan kehään. Valoaukolla tarkoitetaan ikkunan läpinäkyvää aluetta ja kehällä ikkuna-aukon pieliin rajoittuvaa karmirakennetta ja siihen mahdollisesti saranoilla kiinnitettyjä avautuvia puiteosia (Siikanen 2014, s. 57).

Karmi kiinnitetään kiinteästi seinärakenteessa ikkunaa varten olevaan aukkoon, ja se muodostaa rungon ikkunalle (Ikkunawiki). Karmin ja seinän väli tulee tiivistää tilkitsemällä ilmavuotojen estämiseksi. Ikkunawiki-sivuston mukaan karmin ja seinän aukon välinen sauma ja tilkerako peitetään yleensä puusta tai MDF-kuitulevystä valmistetuilla listoilla.

Karmi on ikkunan uloin osa, johon kiinnitetään saranoilla puite, ikkunan avautuva osa. Poikkeuksena ovat kiinteät ikkunat, joissa yleensä ikkunan lasiosa kiinnitetään suoraan karmirakenteeseen ja puite puuttuu ikkunan kehästä. Kaksilasisessa ikkunassa käytetään yleensä erillisiä sisä- ja ulkopuitteita ja kolmilasisessa ikkunassa voidaan käyttää myös välipuitetta. (Ikkunawiki) Ikkunan lasiosa on kiinnitetty puitteeseen, ja siksi puitteen nurkkaliitosten tulee olla jäykkiä, jotta lasin paino ei väännä puitetta vinoksi (Mikkola & Böök 2011, s. 17). Hemmilän ja Saarnin (2001, s. 16) mukaan alumiinisen ulkopuitteen lasi kiinnitetään tavallisesti alumiinisella tai muovisella lasituslistalla ja sisäpuitteen lasi puu- tai muovilistalla. Yleisin Suomessa käytetty karmi- ja puitemateriaali on puu (Hemmilä & Saarni 2001, s. 14). Puu soveltuu hyvin ikkunamateriaaliksi sen lämmöneristyskyvyn ja muotoiltavuuden ansiosta.

Puitteen ja lasin väliin jäävä rako on tiivistettävä sadetta, lämpövuotoja ja ääntä vastaan. Hemmilän ja Saarnin (2001, s. 42) mukaan nykyisin tavallisimpia tiivisteiden valmistusaineita ovat EPDM-kumi, EPDM-solukumi, silikonikumi ja pehmitetty PVC-muovi. Nämä nykyaikaiset tiivisteet ovat täysin ilmatiiviitä.

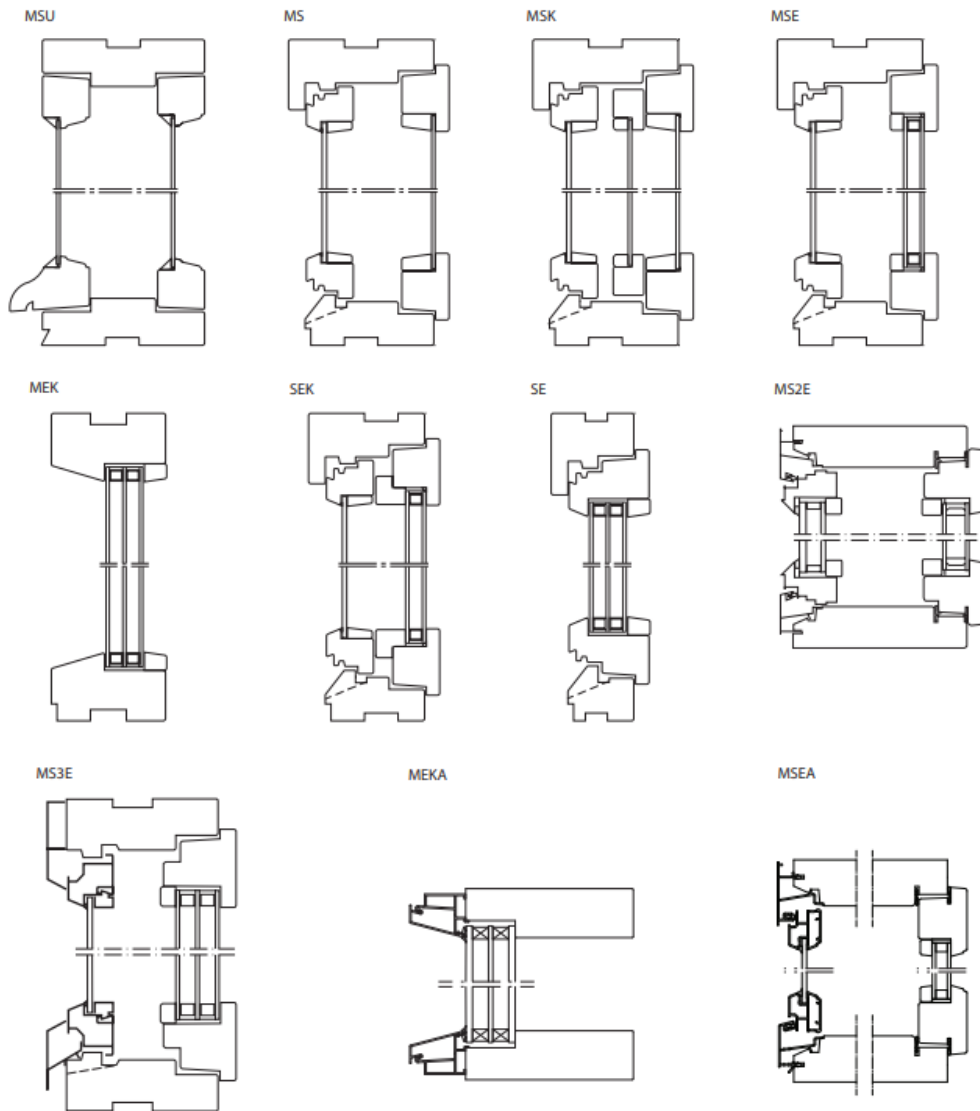
Tavallisesti ikkunoissa käytetään tasolasia eli float-lasia, joka on saanut nimensä sen valmistustavan mukaan. Ikkunoissa voidaan käyttää myös erikoislaseja, kuten eristyslaseja, selektiivilaseja, auringonsuojalaseja, turvalaseja, murtosuojalaseja ja palolaseja. Ikkunan lasiosa on yleensä yli puolet koko ikkunan pinta-alasta (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 9).

2.2 Ikkunatyypit

Ikkunat luokitellaan puitteiden ja lasien lukumäärän mukaan. Myös ikkunan sijainti rakennuksessa, lasin laatu, aukeamistapa ja ikkunan valmistusmateriaalit ovat ikkunoiden luokittelukeinoja. Ikkunan lasien lukumäärän ja käytetyn rakenteen perusteella on määritetty ikkunatyypeille tyyppinimikkeet. Ikkunoiden tyyppinimikkeiden määritelmät on esitetty puu- ja puualumiini-ikkunat ohjekortissa (RT 103241 2020, s. 4) seuraavasti:

- MSU tarkoittaa sisään-/ulosaukeavaa, kaksipuitteista ja kaksilasista ikkunaa.
- MS on sisäänaukeava kaksipuitteinen ja kaksilasinen ikkuna.
- MSK on sisäänaukeava, kolmipuitteinen ja kolmilasinen ikkuna.
- MSE tarkoittaa sisäänaukeavaa, kaksipuitteista ja kolmilasista ikkunaa.
- MEK tarkoittaa kiinteää kaksi- tai kolmilasista eristyslasi-ikkunaa.
- SEK on sisäänaukeava, kaksipuitteinen ja kolmilasinen kytketty ikkuna, jossa sisäpuiteessa on eristyslasi ja ulko- ja sisäpuite on kytketty yhteen.
- SE tarkoittaa sisäänaukeavaa yksipuitteista ikkunaa, jossa on kaksin- tai kolminkertainen eristyslasi.
- MS2E on sisäänaukeava kaksipuitteinen puualumiini-ikkuna, jossa on molemmissa puitteissa kaksilasinen eristyslasi.
- MS3E on sisäänaukeava kaksipuitteinen puualumiini-ikkuna, jossa sisäpuiteessa on kolmilasinen eristyslasi ja ulkopuiteessa yksi lasi.
- MEKA tarkoittaa kiinteää eristyslasi-puualumiini-ikkunaa.
- MSEA tarkoittaa sisäänaukeavaa, kaksipuitteista ja kolmilasista puualumiini-ikkunaa.

Erilaisille ikkunarakenteille on määritetty omat tyyppipiiroksensa. Edellä listattujen ikkunoiden tyyppinimikkeiden vastaavat tyyppipirokset on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ikkunoiden tyyppinimikkeet ja tyyppi- ja poikkileikkäyspirokset (RT 103241 2020, s. 4)

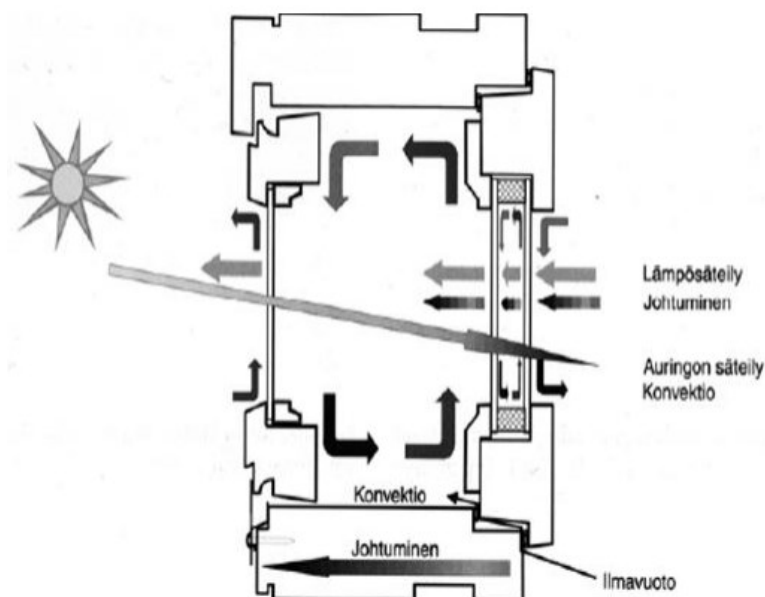
Puitteet voivat olla erillissaranoituja, yhteenkytkettyjä tai näiden yhdistelmiä. Samoin lasit voivat olla erillislaseja tai useampilasisia eristyslaselementtejä tai näiden yhdistelmiä. Puualumiini-ikkunoissa ulkopuute ja karmin ulko-osat on verhottu alumiiniprofililla. Toinen vaihtoehto on, että ulkopuute on alumiinia ja karmi on suojaverhottu alumiinilla. (RT 103241 2020, s. 5)

3. IKKUNAN RAKENNUSFYSIKKA

Rakennuksen sisältä ikkunan läpi siirtyvä lämpö vaikuttaa osaltaan ikkunan lämmöneristävyyteen ja aiheuttaa lämmönhukkaa. Talvella sisälle tuleva auringonsäteily on ilmaislämpöä, mutta kesällä se voi lämmittää huonetiloja liiaksi aiheuttaen viilennystarpeen. Tavalliset ikkunat käsittävät 15–25 % kiinteistön lämmitysenergian kulutuksesta. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 9) Mitä parempi on ikkunan lämmöneristyskyky, sitä pienempi on kiinteistön lämmitysenergian tarve. Ikkunan lämmöneristyskykyä kuvataan U-arvolla.

3.1 Lämmön siirtyminen ikkunassa

Lämpö on aineen molekyylien värähtelyliikettä, joka kasvaa lämpötilan noustessa. Lämpö siirtyy rakenteessa aina korkeammasta lämpötilasta alempaan joko säteilemällä, johtumalla tai konvektion avulla eli kuljettumalla. (Siikanen 2014, s. 40) Ikkunassa lämpö siirtyy kaikilla näillä kolmella tavalla sekä ulko- että sisäpinnoille. Kuvassa 2 on esitetty lämmön siirtymistavat ikkunan läpi.



Kuva 2. Lämmön siirtyminen ikkunan läpi (Hemmilä & Saarni 2001, s. 22)

Säteily on valonnopeudella liikkuvaa sähkömagneettista aaltoliikettä. Siikasen (2014, s. 40) mukaan säteilyn aallonpituudella on merkitystä, kun tarkastellaan ikkunan läpi siirtyvää lämpösäteilyä. Auringon lämpösäteily ja valo ovat aallonpituudeltaan niin lyhyitä, että

kirkas lasimateriaali läpäisee yli 75 % siihen kohdistuvasta auringon säteilystä ja yli 85 % näkyvästä valosta (ASHRAE 15.2). Osa saapuvasta auringon säteilystä absorboituu lasiin ja osa heijastuu siitä. Absorboituessa säteily lämmittää lasia (Hemmilä & Saarni 2001, s. 22). Huonepintojen lähettämä lämpösäteily on sen sijaan niin pitkäaaltoista, ettei se läpäise tämän päivän selektiivipinnoitettuja ikkunalaseja, vaan absorboituu niihin (Hemmilä & Saarni 2001, s. 22; Siikanen 2014, s. 40).

Lasipinnalle on ominaista, että se säteilee silmille näkymätöntä pitkäaaltoista lämpösäteilyä (Lasilipponen). Tätä ilmiötä kuvataan suureella emissiviteetti. Emissiviteetti (ϵ) tarkoittaa pitkäaaltoisen lämpösäteilyn läpäisysuhdetta (Mikkola & Böök 2011, s. 122). Se on suhdeluku, joka on välillä 0–1 niin, että täysin heijastavan pinnan emissiviteetti on 0 ja heijastamattoman 1 (Hemmilä & Saarni 2001, s. 23).

Siikasen (2014, s. 40) mukaan johtuminen tarkoittaa molekyylien liike-energian siirtymistä molekyylistä toiseen, jolloin tapahtuu lämmön virtaamista aineessa. Johtuminen on lämmön siirtymismuoto, jossa aine ei siirry. Ikkunassa johtumista tapahtuu sekä lasiosassa, puitteessa että karmissa.

Konvektio on lämpötilaeroista tai tuulesta aiheutuvaa lämmön siirtymistä ilmavirran mukana. Näitä virtauksia voi olla ikkunan läpi sisältä ulos tai ulkoa sisälle ja ne vaikuttavat omalta osaltaan ikkunan energiankulutukseen. Ilmavuodon määrään ja näin lämpövuotoon vaikuttavat ikkunassa olevien rakojen suuruus ja pinta-ala sekä ikkunan sisä- ja ulkopuolen välinen ilmanpaineen ero. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 22)

Hemmilän ja Saarnin (2001, s. 22) mukaan 2/3 osaa lasiosan lämpöhäviöstä aiheutuu lasien välisestä säteilystä, kun ikkuna on varustettu tavallisilla laseilla. Kolmasosa lämpöhäviöstä aiheutuu lämmön johtumisesta kaasussa ja kuljettumisesta kaasuvirtausten mukana.

3.2 Rakennusosan U-arvo

Lämmönjohtavuus λ on materiaaliominaisuus, joka ilmoittaa lämpövirran tiheyden pituusyksikön paksuisen homogeenisen materiaalikerroksen läpi, kun lämpötilaero materiaalikerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen (Siikanen 2014, s. 41). Lämmönjohtavuuden yksikkö on W/mK. Rakennusaineiden lämmönjohtavuuden suunnittelu-arvoja on esitetty esimerkiksi Suomen Rakentamismääräyskokoelman osassa C4.

Lämmönvastus ilmoittaa rakenteen pintojen välisen lämpötilaeron ja materiaalikerroksen läpi kulkevan lämpövirrantiheyden suhteen (Siikanen 2014, s. 46). Materiaalikerroksen lämmönvastus R_j määritellään kaavalla

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j}, \quad (1)$$

missä d_j on materiaalikerroksen paksuus ja λ_j materiaalin lämmönjohtavuus. Lämmönvastuksen yksikkö on $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$. (Siikanen 2014, s. 51)

Rakennusosan ainekerrosten ollessa tasapaksuja ja homogeenisiä ja lämmön siirtyessä ainekerrokseen nähden kohtisuorassa, lasketaan rakennusosan kokonaislämmönvastus kaavalla

$$R_t = R_{si} + \sum_{j=i}^x R_j + R_{se}, \quad (2)$$

missä R_{si} on sisäpinnan vastus, $\sum_{j=i}^x R_j$ on lämmönvastusten summa sisäpinnasta rajapintaan x ja R_{se} on ulkopinnan vastus (Siikanen 2014, s. 51). Sisä- ja ulkopuolinen pintavastus ilmoittavat rakennusosan pinnan ja sen ympäristön välisen rajakerroksen lämmönvastuksen. Sisäpuolinen pintavastus riippuu lämpövirran kulkusuunnasta. Lämpövirran kulkiessa ylöspäin, vaakasuoraan tai alaspäin, voidaan sisäpuolen pintavastukselle vastaavasti käyttää arvoja $0,10 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$, $0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ tai $0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$. Ulkopuolen pintavastuksen voidaan olettaa olevan kaikissa lämpövirran kulkusuunnissa $0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$. (Siikanen 2014, s. 46)

Rakennusosien lämmöneristyskykyä kuvataan lämmönläpäisykerroimen avulla. Lämmönläpäisykerroin, eli U-arvo, kuvaa rakennusosan läpi kulkevan lämpötehon suuruutta pinta-alayksikköä ja pintojen välillä vaikuttavaa lämpötilaeroa kohden (Hemmilä & Saarni 2001, s. 21). Lämmönläpäisykerroin siis ilmoittaa rakennusosan läpäisevän lämpövirran tiheyden.

Lämmönläpäisykerroimen arvo materiaalikerrokselle saadaan Siikasen (2014, s. 51) mukaan materiaalikerroksen lämmönvastuksen käänteislukuna

$$U = \frac{1}{R_j}. \quad (3)$$

Mitä pienempi rakennusosan U-arvo on, sitä parempi on rakennusosan lämmöneristävyys. Arvon yksikkö on $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

3.3 Kylmäsillat

Monet rakenteet sisältävät materiaalikerroksen, jonka toinen materiaali katkaisee säännöllisesti. Kun katkaisevan materiaalin lämmönjohtavuus on sitä ympäröivää materiaalia suurempi, muodostuu rakenteeseen kylmäsilta. (Evans 2019) Kylmäsilta on Siikasen (2014, s. 46) mukaan lämpöä eristävässä rakenteessa sellainen kohta, joka johtaa lämpöä huomattavasti enemmän kuin sitä ympäröivä rakenne ja aiheuttaa näin ylimääräistä lämpöhäviötä rakenteen läpi. Esimerkiksi erilaiset metalliset jäykisteet ja siteet voivat toimia rakenteessa kylmäsiltoina. Kun rakenteessa ilmenee sille ominaisia säännöllisesti toistuvia kylmäsiltoja, otetaan ne huomioon määrittäessä rakenteen lämmönläpäisykerrointa (RakMK C4 2003, s. 5).

Kylmäsilta voi olla pistemäinen tai viivamainen. Pistemäinen kylmäsilta on nimensä mukaan paikallinen eikä sillä ole rakenteen pinnan suunnassa jatkuvaa poikkileikkausta. Viivamaisella kylmäsilalla on poikkileikkaus ja se on jatkuva rakenteen pinnan suunnassa. (Siikasen 2014, s. 46)

Ikkunat ovat rakennusosia, joissa esiintyy viivamaisia kylmäsiltoja. Viivamainen lisäkonduktanssi ψ kuvaa ylimääräistä lämmön virtausta, joka syntyy puitteen ja lasiosan reunan yhtymäkohdassa välilistan vaikutuksesta (ISO 10077-2 2017, s. 44). Lämmön virtaus on suurempaa lasituksen reuna-alueella johtuen lasia paremmin lämpöä johtavasta listoituksesta (ASHRAE 15.2). Viivamaisten kylmäsiltojen lisäkonduktanssin arvo voidaan määrittää laskentaohjelmalla, ohjearvotaulukoiden avulla tai numeerisesti laske-
malla. Standardin ISO 10077-2 (2017, s. 44) mukaan viivamaisen lisäkonduktanssin arvo määritetään numeerisesti kaavalla

$$\psi = L_{\psi}^{2D} - U_f b_f - U_g b_g, \quad (4)$$

missä L_{ψ}^{2D} on kaksiulotteisella laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekkinen yhteyttäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille, U_f puitteen lämmönläpäisykerroin, b_f ikkunan kehäosan paksuus, U_g lasitteen keskialueen lämmönläpäisykerroin ja b_g lasitteen näkyvän osan leveys. Viivamaisen lisäkonduktanssin yksikkö on W/mK. Lisäkonduktanssi on laskenta-alueen todellisen lämpövirran ja lämmönläpäisykerroimilla lasketun lämpövirran erotus.

4. IKKUNAN U-ARVO

Ikkunan teoreettisen U-arvon avulla ei voida arvioida todenmukaisesti ikkunan kautta tapahtuvaa energiahäviötä. Tämä johtuu siitä, että ikkunan kautta tulee vuoden aikana enemmän energiaa sisälle, kuin mitä energiahukka on ikkunan kautta ulos. (Siikanen 2014 s. 56) Teoreettisessa U-arvossa ei huomioida ikkunan läpi tulevaa säteilyä eikä rakennuksen materiaalien kykyä varastoida siitä tulevaa lämpöä, ja siksi ikkunan teoreettinen U-arvo on vain suuntaa antava (Mikkola & Böök 2011, s. 21).

Laskettaessa ja/tai arvioitaessa ikkunan U-arvoa tulee ikkunan keskiosan lisäksi ottaa huomioon myös lasiosan reuna-alueet, kehäosa, ikkunan koko, olosuhteet ja mahdollinen asentamisen epätäydellisyys (Pilkington 2018, s. 11). Ikkunan valmistaja ilmoittaa ikkunan teknisten tietojen yhteydessä ikkunan U-arvon. Jokainen maa on määrittänyt ikkunoille omat U-arvovaatimuksensa ja niiden eroavaisuudet johtuvat pääosin erilaisista sääolosuhteista.

4.1 U-arvon laskennallinen määrittäminen ikkunalle

Useimmiten ikkunapinta-ala koostuu läpinäkyvistä monilasisista lasielementeistä, puitteista ja karmista. Poikkeuksena ovat kiinteät ikkunat, joissa lasitus kiinnitetään yleensä suoraan karmirakenteeseen ja näin ollen puiteosa puuttuu kehästä. Lämmön voidaan ajatella siirtyvän ikkunan läpi kolmea eri reittiä: lasiosan keskialueen, lasiosan reuna-alueen ja kehäosan läpi. Kun nämä eri alueiden läpi siirtyvän lämmön määrät tunnetaan, voidaan laskea ikkunan läpi siirtyvän lämmön kokonaismäärä pinta-alaa kohden, eli ikkunan U-arvo. (ASHRAE 2017 15.4)

Lämpövirta lasin keskialueen läpi käsittää sekä säteilevän lämmön että johtuvan lämmön lasin läpi. Valoaukon lämmönläpäisykerroin lasketaan kaavalla

$$U_g = \frac{1}{R_{si} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{sj} + R_{se}}, \quad (5)$$

missä R_{si} on sisäpuolinen pintavastus, λ_j lasin tai muun läpinäkyvän ainekerroksen lämmönjohtavuus, d_j lasin tai muun läpinäkyvän ainekerroksen paksuus, R_{sj} lasivälin lämmönvastus ja R_{se} ulkopuolinen pintavastus. (Sundell 2004, s. 26; ISO 10077-1 2017, s. 18) Joillakin lasinvalmistajilla on oma laskentaohjelma valoaukon lämmönläpäisykertoi-
men määrittämistä varten. Myös Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 on esitetty joillekin ikkunan eri rakennetyypeille valmiiksi taulukoituna valoaukon U-arvoja.

Ikkunan kehäosan voidaan ajatella koostuvan kaikista ikkunan muista lasitusta ympäröivistä osista. Lisäksi pystyvälikarmi voidaan luokitella ikkunan kehäosaan. (ASHRAE 2017 15.5) Standardin ISO 10077-2 (2017, s. 44) mukaan kehäosan U-arvo lasketaan kaavalla

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_g b_g}{b_f}, \quad (6)$$

missä L_f^{2D} on kaksiulotteisella laskennalla määritetty lämmönjohtavuus tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille, U_g valoaukon lämmönläpäisykerroin, b_g lasitteen näkyvän osan leveys ja b_f on kehäosan paksuus.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C4 (2003, s. 22) on esitetty vaihtoehtoinen kaava ikkunan kehäosan lämmönläpäisykerroimen laskemiseksi. Kyseinen kaava on muotoa

$$U_f = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{\beta \cdot d}{\lambda_n}}, \quad (7)$$

missä R_{si} on sisäpuolinen pintavastus, R_{se} ulkopuolinen pintavastus, d karmi- ja puiteosan keskimääräinen paksuus, λ_n karmi- ja puiteosan normaalin lämmönjohtavuus ja β todellisuudessa moniulotteisen lämpövirtauksen huomioon otettava korjauskerroin, jonka arvona käytetään 0,7. Kaavaa 7 käytetään Suomessa yleisemmin ikkunan kehäosan U-arvoa laskettaessa.

Euroopassa, ja siis myös Suomessa, ikkunan U-arvoa laskettaessa käytetään yhtälöä, jossa lasiosan reuna-alueella siirtyvä lämpö otetaan huomioon viivamaisen lisäkonduktanssin avulla (ASHRAE 2017 15.4). Yksittäisen ikkunan keskimääräiselle U-arvolle on määritetty standardissa SFS-EN ISO 10077-1 (2017, s. 20) kaava

$$U_w = \frac{\sum U_g A_g + \sum U_f A_f + \sum l_g \psi_g}{A_g + A_f}, \quad (8)$$

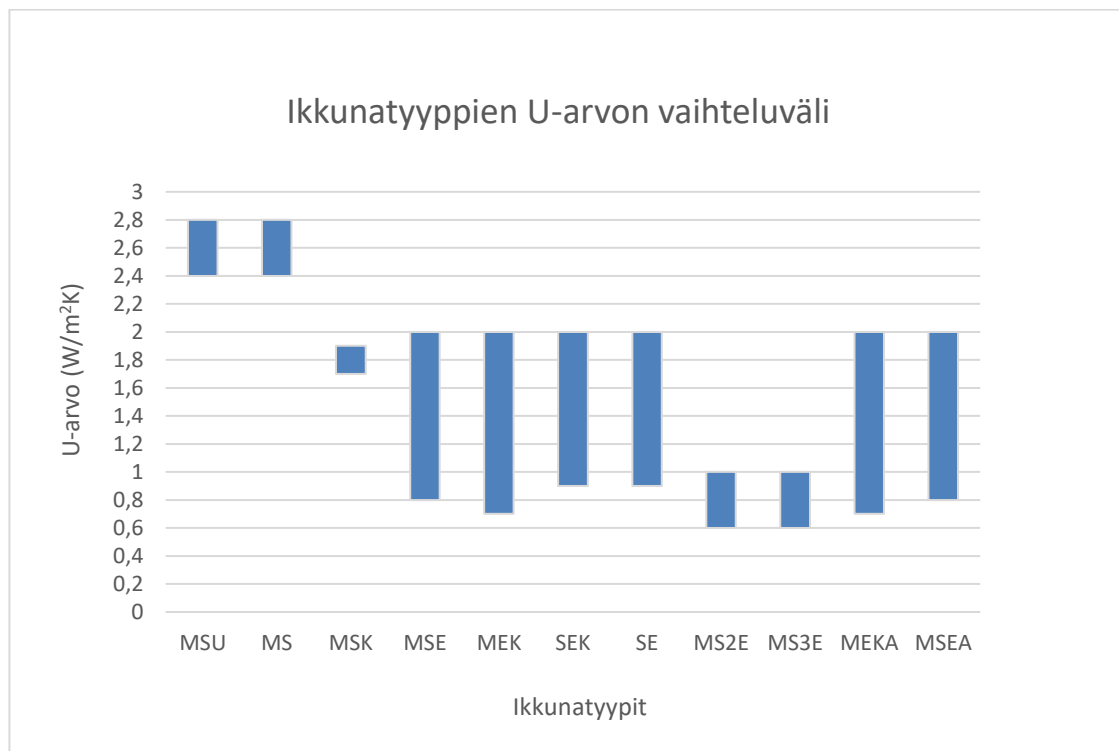
missä U_g on lasituksen lämmönläpäisykerroin, A_g lasitettu pinta-ala, U_f kehäosan lämmönläpäisykerroin, A_f kehäosan pinta-ala, l_g viivamaisen kylmäsilan pituus ja ψ_g viivamainen lisäkonduktanssi.

4.2 Ikkunan U-arvovaatimukset

Ikkunoiden U-arvovaatimukset ovat 2000-luvulla kiristyneet huomattavasti. Vuodesta 1974 vuoteen 2003 U-arvovaatimus uudisrakentamisessa oli lämpimän tilan ikkunoille 2,1 W/m²K. Vuodesta 2003 lähtien vaadittu arvo on ollut 1,4 W/m²K ja 2010 alkaen 1,0

W/m²K. Nykyään puolilämpimän tilan ikkunan lämmönläpäisykerroin saa olla enintään 1,4 W/m²K ja lämpimän tilan rajoituessa puolilämpimään tilaan, saa lämmönläpäisykerroin olla enintään 2,8 W/m²K (RakMk D3 2012, s. 11,13). Loma-asumiseen suunnitellun pientalon lämpimän tilan ikkunan lämmönläpäisykerroin saa olla enintään 1,4 W/m²K (1010/2017). Lämpimällä tilalla tarkoitetaan rakennuksen tilaa, jonka huonelämpötila on +17°C tai korkeampi. Puolilämpimällä tilalla tarkoitetaan tilaa, jonka huonelämpötila on alle +17°C, mutta yli +5°C. Puolilämmintä tilaa ei ole tarkoitettu jatkuvaan oleskeluun normaalia sisävaatetusta käyttäen. (1010/2017) Vuoteen 2003 asti huomioitiin vain lasituksen U-arvo, mutta sittemmin laskelmiin on otettu mukaan myös ikkunan kehäosa (Mikkola & Böök 2011, s. 23). Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 esitetyt U-arvovaatimukset koskevat vain uudisrakentamista. Mikäli vanhoja ikkunoita kunnostetaan, on niiden lämmöneristävyttä parannettava mahdollisuuksien mukaan.

Suomessa käytössä olevien ikkunatyyppeiden suuntaa antavia U-arvoja on esitetty ohjekortissa RT 103241 (2020, s. 4). Nämä eri ikkunatyyppeiden U-arvojen vaihteluvälit on koottu kuvaajaan, joka on esitetty kuvassa 3. Tarkemmat ikkunan rakennetta vastaavat U-arvot saadaan ikkunan valmistajan sivuilta.



Kuva 3. Kuvaaja eri ikkunatyyppeiden U-arvon vaihteluväleistä

Kuvan 3 kuvaajasta nähdään, että kaksilasiset MSU- ja MS-ikkunat ovat lämmöneristyskyvyltään selvästi muita ikkunatyyppejä huonompia. Näitä ikkunoita käytetäänkin nykyään lämpimän tilan rajoittuessa puolilämpimään tilaan, jolloin ikkunoilta ei vaadita niin pientä U-arvoa. Lämpimissä tiloissa, eli asuinrakennuksissa, tulee tänä päivänä käyttää vähintään kolmilasisia ikkunoita, jotta riittävä lämmöneristyskyky voidaan saavuttaa. Ensin Suomessa otettiin käyttöön kolmilasinen ja kolmipuitteinen MSK-ikkuna, jota nykyään käytetään harvoin. Eristyslaseielementillä varustettu MSE-ikkuna syrjäytti MSK-ikkunan ja on Suomessa yleisin käytössä oleva ikkunatyyppi (Hemmilä & Saarni 2001, s. 11). Kun MSE-ikkunaan lisätään eristyslaseielementtejä, voidaan ikkunan U-arvoa pienentää edelleen.

Kun ikkunan valmistusmateriaalit ja lasilaadut tiedetään, voidaan ikkunalle määrittää suorituskkyky. Esimerkiksi Pilkington on kehittänyt laskentaohjelman Pilkington Spectrum, jonka avulla voidaan laskea haluamaa lasiyhdistelmää vastaava suorituskkyky. Ikkunan suorituskkyvyllä tarkoitetaan koontia lasituksen ominaisuuksista, jotka esitetään suorituskkykykoodina U/LT/g, eli U-arvo/valonläpäisy/aurinkoenergian kokonaisläpäisy. (Pilkington 2018, s. 7)

5. IKKUNAN U-ARVOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Ikkunoiden lämmöneristävyys perustuu lasivälin kaasukerroksen lämmöneristävyyteen, eikä itse lasien lämmöneristävyydellä ole niinkään suurta merkitystä. Ikkunan lämmöneristyskykyä voidaan parantaa tehokkaimmin lisäämällä siihen laseja, jolloin lasivälin ja kaasukerrosten määrä lisääntyy. Parannus on vielä huomattava lisättäessä kolmas lasi kaksilasiseen ikkunaan. Tämän jälkeen lasien lisääminen ei ole lämmönläpäisykertoimen kannalta hyödyllistä. Lisäksi lasien määrän lisääntyessä ikkunan paino ja sisäiset heijastumiset lisääntyvät sekä ikkunan läpäisevän valon määrä pienenee. Jos lasien lisääminen ei ole enää kannattavaa, voidaan lämmöneristävyttä parantaa pienentämällä lämmön siirtymistä lasien välissä ja vähentämällä lämmön johtumissa ikkunan kehärakenteessa. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 22)

Kun ikkunassa käytetään tavallisia laseja, lasiosan lämmöneristävyys on yhtä hyvä tai huonompi kuin ikkunan kehäosan lämmöneristävyys. Optimaalisessa tilanteessa valoaukon ja kehäosan lämmöneristävyys ovat yhtä suuria. Tällöin ikkunan koolla ei ole sen U-arvon kannalta merkitystä. Puuikkunoiden kehäosan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin on luokkaa 1,4–2,0 W/m²K ja kehäosan ollessa metallia, arvo on noin 2,0–3,0 W/m²K. (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 9)

5.1 Lasiosa

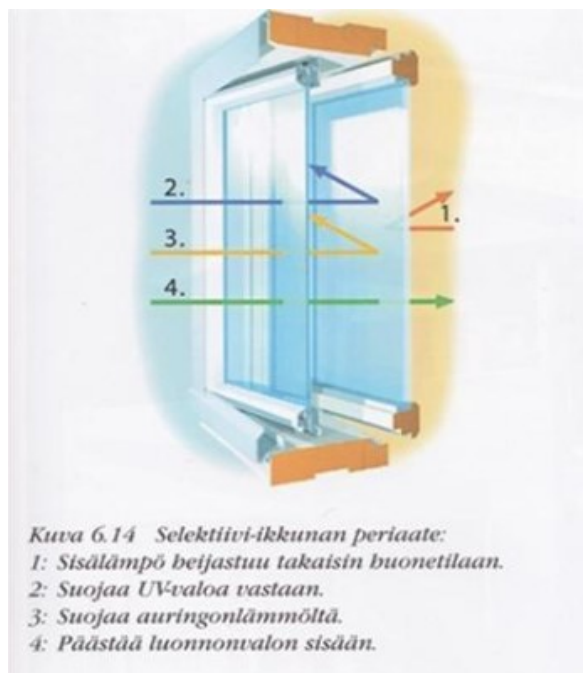
Ikkunan lämmöneristävyden kannalta lasiosa on ratkaisevassa asemassa. Lasien lukumäärällä voidaan vaikuttaa ikkunan lämmöneristävyyteen merkittävästi. Hemmilä ja Saarni (2001, s. 21) arvioivat, että vanhojen yksilasisten ikkunoiden lämmönläpäisykerroin on noin 5,8 W/m²K ja vastaava arvo vanhoille kaksilasisille ikkunoille on 2,5 W/m²K. Kolmilasisilla ikkunoilla päästään alle 2,0 W/m²K.

Myös lasien välisellä etäisyydellä pyritään vaikuttamaan ikkunan lämmönläpäisykertoimen arvoon. Etäisyyden optimoinnin avulla ei kuitenkaan saavuteta yhtä selvää parannusta kuin lasien lukumäärää lisäämällä. Sisä- ja ulkopuitteen välisen etäisyyden on todettu olevan sopiva, kun se on noin 10 cm (Mikkola & Böök 2011, s. 23).

Suomalaisissa ikkunoissa sisäpuitteissa käytetään usein useammasta lasista koostuvia elementtejä, joissa lasit yhdistetään ilmatiiviisti toisiinsa välilistoilla ja tiivistysmassoilla. Näitä elementtejä kutsutaan eristyslaseiksi. Eristyslaseissa käytetään alumiinista, teräksistä, muovista tai TPS-välilistaa eli lämpömassalistaa. (Mikkola & Böök 2011, s. 121) Eristyslasiä käsitellään tarkemmin alaluvussa 5.3.

5.2 Selektiivilasi

Ikkunan lämmöneristämisen parantamiseen voidaan käyttää selektiivilasia, joka on läpinäkyvällä, ohuella metalli- tai metallioksidikerroksella pinnoitettua lasia. Sen säteilynläpäisy ja heijastusominaisuudet ovat selektiivisiä eli säteilyn aallonpituudesta riippuvia. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 23) Selektiivilasi läpäisee auringon lyhytaaltoisen säteilyenergian heijastaen samalla takaisin huoneesta ulos pyrkivää pitkäaaltoista lämpösäteilyä (Lasilipponen). Tämän seurauksena ikkunan sisäpinnan lämpötila pysyy korkeana, mikä vähentää vedon tunnetta (Sundell 2004, s. 58). Selektiivilasi vähentää myös jonkin verran auringon lämpöenergian ja näkyvän valon pääsyä huonetilaan. (Mikkola & Böök 2011, s. 122) Selektiivilasin toimintaa havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Selektiivilasilla varustetun ikkunan toimintaperiaate (Sundell 2004, s. 59)

Selektiivilasin toiminta perustuu siihen, että metallikerros vähentää ikkunan lasien välistä lämpösäteilyä ja parantaa näin ikkunan lämmöneristävyyttä. Metallikerros on paksuudeltaan yleensä 5–100 nm. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 23) Selektiivipinnoitteita on kahdenlaisia: pehmeitä ja kovia. Kovapinnoitteinen selektiivilasi on float-menetelmällä valmistettu lasi, johon jatkokäsittelynä lisätään metallikerros. Metallikerros lisätään kuumen lasilevyn pintaan ja se reagoi lasin kanssa muodostaen pysyvän sidoksen. Pehmeäpinnoitettu selektiivilasi puolestaan valmistetaan sputteroimalla, eli ruiskuttamalla tyhjiössä, yksi tai useampi pinnoitekerroksia lasilevyn pintaan. Tällöin metallikerrokset eivät reagoi

lasin kanssa, minkä vuoksi selektiivinen pinta ei ole yhtä kestävä kuin kovapinnoitetun lasin pinta. (Hemmilä & Heimonen 1999 s. 13)

Sundellin (2004, s. 58) mukaan selektiivilasia käytetään yleensä eristyslaselementeissä ja ikkunan sisimmäisenä lasina. Eristyslaselementeistä koostuvissa ikkunoissa on yleensä ainakin yksi selektiivilasi. Ikkunoissa, joissa on kaksilasinen eristyslasi, käytetään vain yhtä selektiivilasia. Tämä johtuu siitä, ettei toinen selektiivilasi paranna merkittävästi lämmöneristävyyttä kyseisessä rakenteessa. Toinen selektiivilasi on kannattavaa lisätä silloin, kun eristyslasi koostuu kolmesta lasista. Tällöin ikkunan U-arvossa voidaan saavuttaa merkittävä parannus. (RT 38-10941 2008, s. 8) Pehmeäpinnoitteiset selektiivilasit tulee asentaa pinnoite eristyslasin välitilaan päin. Eristyslasin lämmöneristyskykyyn ja valonläpäisyyn ei vaikuta, vaikka selektiivilasi asennettaisiin ulommaksi. Auringon lämpöenergian läpäisyyn tämä kuitenkin vaikuttaa. Ulompana lasina ollessaan, selektiivilasi päästää lävitseen noin 5–10 % vähemmän auringon lämpöenergiaa kuin sisimpänä lasina ollessaan. (Sundell 2004, s. 58)

Selektiivilasin ominaisuutta kuvataan emissiviteetillä. Mitä pienempi pinnoitteen emissiviteetti on, sitä parempi on lasin lämmöneristävyys. Selektiivilasista käytetäänkin myös nimitystä matalaemissiviteettipinnoitettu lasi, lyhyemmin LE-lasi tai low-e-lasi (Mikkola & Böök 2011, s. 122). Tavallisen lasin emissiviteetti on 0,873 (RT 38-10941 2008, s. 6). Hemmilän ja Saarnin (2001, s. 23) mukaan vastaava arvo on selektiivilasille pienimmillään 0,04.

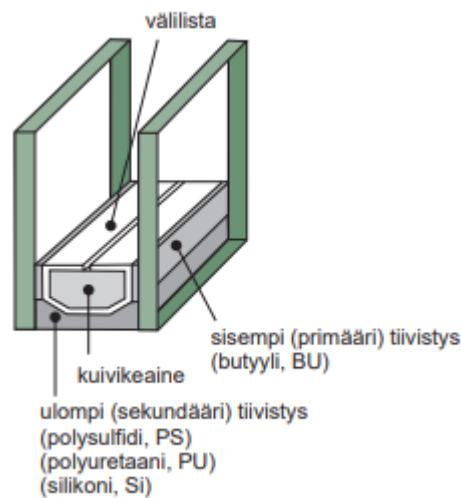
Hyvin lämpöä eristävässä ikkunoissa ongelmana on usein lasin huurtuminen ulkopinnasta. Kun uloimman lasin ulkopinnassa on selektiivinen pinnoite, se ehkäisee lasin huurtumista ja kuuran kertymistä. Ikkunoissa, joiden lasiosan U-arvo on 0,47 W/m²K tai enemmän, voidaan kuuran muodostumista ehkäistä käyttämällä ulompana lasina selektiivilasia, jonka emissiviteetti on 0,2. Säänkestävät ja esteettisesti hyväksyttävät selektiivipinnoitteet ovat jatkuvan kehityksen kohteena lasituksessa, jonka lasiosan U-arvo on alle 0,5 W/m²K. Tulevaisuudessa näitä hyvin matalan lämmönläpäisykertoimen omaavia ikkunoita tullaan tarvitsemaan energianeutraaleihin ikkunalaseihin. (Gläser & Ulrich 2013, s. 131)

5.3 Eristyslasi

Eristyslaselementin rakenteella on suuri merkitys sen lämmöneristävyyteen. Eristyslaselementti voi koostua kahdesta, kolmesta tai neljästä lasista ja lasien lukumäärän kasvaessa lasiosan U-arvo paranee. Lasien lukumäärän ohella myös lasivälien lukumäärä

ja niiden etäisyys vaikuttavat lämmöneristävyyteen. Lisäksi lämmöneristävyyteen voidaan vaikuttaa erilaisilla lasien pinnoitteilla. Lasien välissä on välilista, joka muodostaa lasien väliin ilmatiiviin välitilan. Lasiväleissä voidaan käyttää täytekaasuna ilman sijasta paremmin lämpöä eristäviä kaasuja. Eristyslaselementin lämmöneristävyyteen vaikuttaa myös elementtiin kuuluvan välilistan lämmönjohtavuus, joka riippuu käytetystä materiaalista. (RT 38-10941 2008, s. 6)

Välilista on ontto ja sen sisään laitetaan rakeista kuivikeainetta, jonka tarkoitus on poistaa valmistusvaiheessa välitilaan jäävä kosteus. Välilistassa on reiät, jotta välitilan kaasun kosteus voi sitoutua kuivikeaineen huokosiin. (RT 38-10941 2008, s. 2) Kuvassa 5 on esitetty esimerkki mahdollisesta eristyslaselementin rakenteesta.



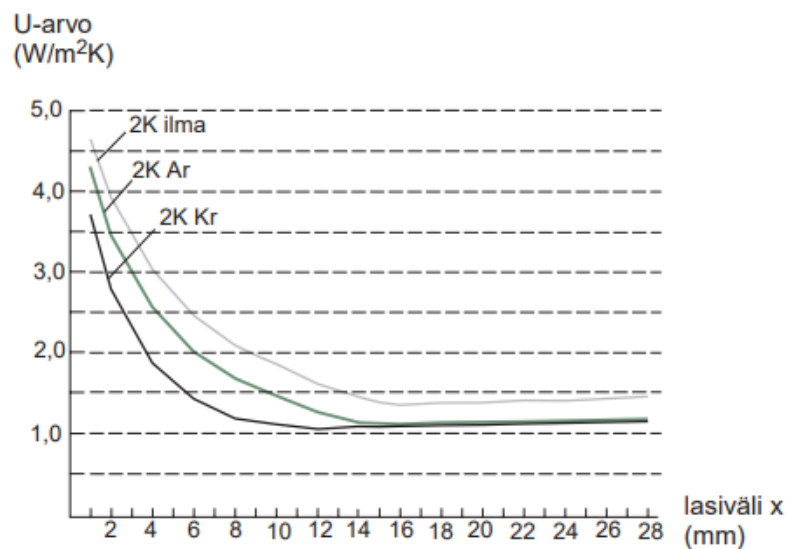
Kuva 5. Eristyslaselementin rakenne-esimerkki (RT 38-10941 2008, s. 2)

Välilistan leveys määrittelee eristyslasin lasivälin leveyden. Välilistat ovat yleensä alumiinisia ja yleisimmät leveydet ovat 9, 12, 15 ja 18 mm. Alumiinisten välilistojen lisäksi käytetään myös ruostumattomasta teräksestä valmistettuja välilistoja ja muovi- ja komposiitivälilistoja, joiden lämmöneristävyydet ovat alumiinista listaa paremmat. Näiden välilistojen tyypilliset leveydet ovat 8, 10, 12 ja 16 mm. Välilistoista kootun listakehän materiaali vaikuttaa eristyslaselementin lämmöneristävyyteen elementin reunalla, sillä se muodostaa reuna-alueelle kylmäsilan.

Normaalisti eristyslasin välitilassa on täytekaasuna ilmaa. Ilma voidaan kuitenkin korvata hidasliikkeisemmällä ja huonommin lämpöä johtavalla jalokaasulla, kuten argonilla, kryptonilla tai ksenonilla, jolloin ikkunan lämmöneristävyys paranee. Näistä kaasuista argon on eniten käytetty, koska se on näistä kolmesta kaasusta yleisimmin esiintyvää ja siksi

halvinta. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 23) Eristyslasin täytekaasuja tarkastellaan tarkemmin alaluvussa 5.4.

Lasivälillä on rakenteesta ja täytekaasusta riippuva optimietäisyys. Lasivälin ollessa kaipa, johtuminen lasien läpi on suurta, mutta konvektio pientä. Vastaavasti levennettäessä lasiväliä johtuminen vähenee, mutta konvektio lisääntyy. (RT 38-10941 2008, s. 7) Tämä tarkoittaa sitä, että lasivälin leventäminen parantaa lämmöneristävyyttä vain tiettyyn etäisyyteen saakka, jonka jälkeen lasiväliä leventämällä lämmöneristävyys alkaa vähitellen huonontua. Tätä ilmiötä havainnollistetaan kuvassa 6, jossa on esitetty kaksilasisen eristyslasielementin lasivälin vaikutus U-arvoon eri täytekaasuilla. Toinen eristyslasielementin lasista on selektiivilasi, jonka emissiviteetti $\epsilon=0,03$.



Kuva 6. Kaksilasisen eristyslasin lasivälin vaikutus U-arvoon (RT 38-10941 2008, s. 7)

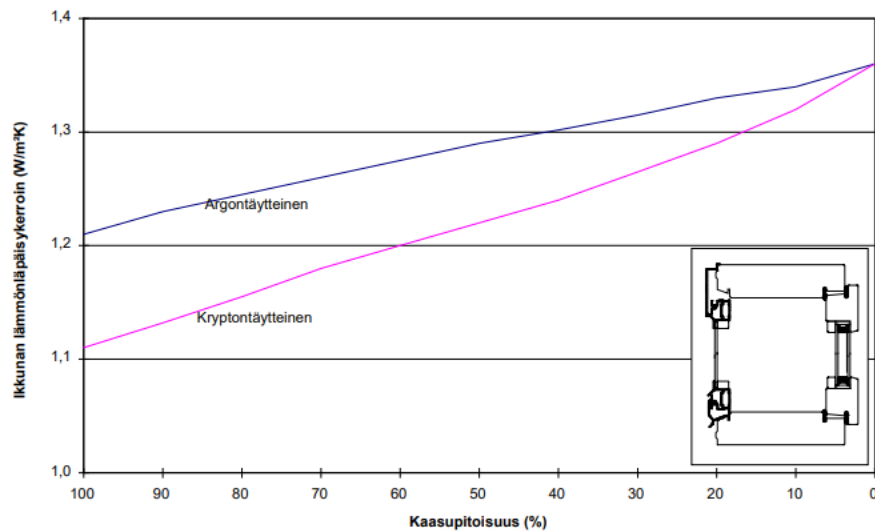
Kuvan 6 kuvaajasta voidaan lukea kaksilasisen eristyslasin optimi lasiväli eri täytekaasuille. Ilmalle optimi lasiväli on 16 mm, argonille 15 mm ja kryptonille 10 mm.

5.4 Eristyslasin täytekaasut

Eristyslasin välitilassa voidaan käyttää täytekaasuna ilman lisäksi argonia, kryptonaa tai ksenonia, jotka ovat suurimolekyylisiä jalokaasuja. Näiden jalokaasujen lämmönjohtavuudet ovat pienempiä kuin ilmalla, joten tämän seurauksena ne parantavat ikkunan lämmöneristävyyttä. Ilman lämmönjohtavuuden ollessa keskimäärin 0,026 W/mK, ovat jalokaasujen lämmönjohtavuudet argonilla 0,018 W/mK, kryptonilla 0,0095 W/mK ja ksenonilla 0,0055 W/mK (Cuce & Riffat 2015, 4.1.9). Jalokaasujen viskositeetit ovat vastaa-

vasti ilman arvoa suurempia, mikä tarkoittaa, että jalokaasut ovat ilmaa hidasliikkeisempiä. Mitä suurempimolekyylisempi jalokaasu on, sitä harvinaisempaa ja kalliimpaa se on. Tästä syystä argon on yleisimmin käytetty täytekaasu, kryptonin ja ksenonin ollessa paljon harvinaisempia. Argon, krypton ja ksenon pitoisuudet ilmassa ovat 0,934 %, 0,000114 % ja 0,0000087 %. (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 22)

Täytekaasujen käyttöön liittyy eräs ongelma. Eristyslasin eristyskyky nimittäin heikkenee ajan kuluessa johtuen siitä, että jalokaasu pääsee vuotamaan lasivälistä noin prosentin vuodessa (Mikkola & Böök 2011, s. 121). Tätä pyritään rajoittamaan tiivistämällä eristyslasin reuna plastisella tiivistysmassalla (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 24). Kuvassa 7 on esitetty kuvaaja eristyslasin kaasun täyttöasteen vaikutuksesta ikkunan lämmönläpäisykertoimeen. Kyseinen ikkuna on alumiinisella ulkopuitteella varustettu 1,2 m*1,2 m -kokoinen MSE-ikkuna, jossa on yksi selektiivilasi.

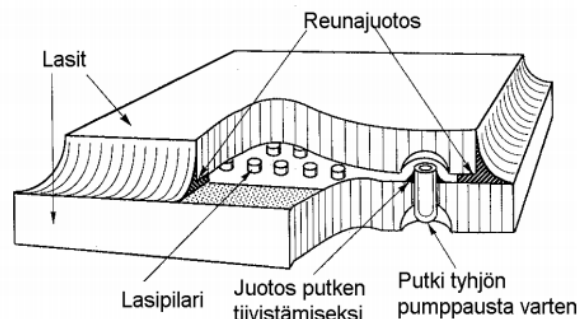


Kuva 7. Eristyslasin kaasun täyttöasteen vaikutus lämmönläpäisykertoimeen (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 23)

Kuvasta 7 nähdään, että täytekaasun pitoisuuden vaikutus kasvaa lähes suoraviivaisesti 0 % täytöstä, eli pelkästä ilmasta, 100 % täyttöön. Jos täytekaasua vuotaa 1 % vuodessa ja eristyslasin kaasupitoisuus on 90 % valmistuksen jälkeen, on 20 vuoden kuluttua täytekaasua jäljellä 74 %. Tällöin kryptontäyteisen ikkunan U-arvo on kasvanut noin 0,03 W/m²K. (Hemmilä & Heimonen 1999, s. 23)

5.5 Tyhjiölasi

Tyhjiölasi koostuu kahdesta lasilevystä, joiden väliin imetään tyhjiö. Lasiväli tiivistetään joko juotetulla lasilla tai indiumseoksella. Tyhjiön ansiosta lämpö ei voi siirtyä lasivälin kaasussa johtumalla tai konvektiolla. Lasien välissä on joukko tukipilareita, jotka pitävät lasilevyt erillä toisistaan. Tukipilareiden materiaalina käytetään lasia, ruostumatonta terästä tai nikkelseosta. Merkittävä osa kokonaislämmönsiirrosta lasiosan läpi siirtyy tukipilareiden kautta johtumalla. Nämä pilarit ovat usein huomaamattomia tietyltä etäisyydeltä, eivätkä ne haittaa näkyvyyttä lasin läpi. Ensimmäinen tyhjiölasi valmistettiin onnistuneesti Sydneyn yliopistossa vuonna 1989. (Cuce & Riffat 2015, s. 700–701) Periaatekuva kyseisestä tyhjiölasista on esitetty kuvassa 8.

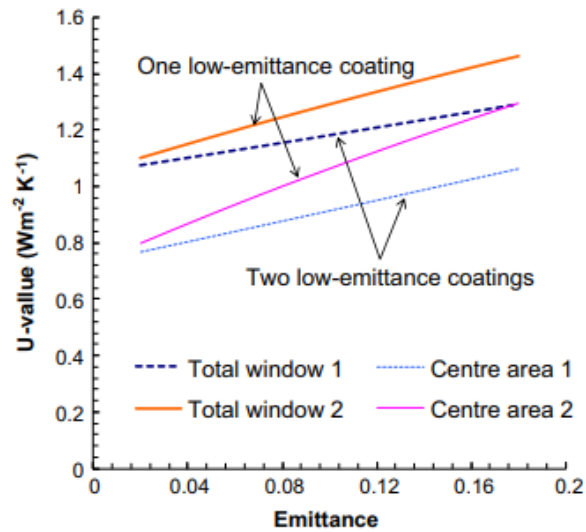


Kuva 8. Periaatekuva tyhjiölasista, joka on valmistettu Sydneyn yliopistossa (Hemmilä et al. 1999, s. 20)

Tukipilarin halkaisija on tyypillisesti 0,25–0,5 mm ja korkeus 0,1–0,2 mm. Pilarit sijoitetaan neliön muotoiseen muodostelmaan ja niiden väliset etäisyydet riippuvat käytetyn lasin paksuudesta. Lasin paksuuden ollessa 3, 4, 5 tai 6 mm, ovat pilareiden väliset etäisyydet 20, 25, 30 tai 35 mm. Tukipilarin korkeus ei vaikuta tyhjiölasin U-arvoon merkittävästi. Pilarin korkeuden kasvaessa 0,6 mm tyhjiölasin U-arvo laskee vain 0,008 W/m²K. Tästä syystä tukipilarin korkeuden vaikutus voidaan jättää huomiotta. Tukipilarin halkaisijan kasvaessa pilarissa johtumalla siirtyvän lämmön määrä kasvaa. Tällöin koko pilari-muodostelman lämmönjohtavuus kasvaa, jolloin koko tyhjiölasin U-arvo kasvaa. (Fang et al. 2014, s. 487–489)

Lämpösäteilyä lasien välillä voidaan vähentää merkittävästi käyttämällä laseissa selektiivipinnoitetta (Cuce & Riffat 2015, s. 701). Näin pystytään parantamaan tyhjiölasin U-arvoa entisestään. Kuvassa 9 on esitetty kuvaaja yhden ja kahden selektiivilasin vaikutuksesta tyhjiölasin U-arvoon eri emissiviteetin arvoilla. Fang et al. (2014) ovat määrittäneet kuvaajan ennustettujen arvojen avulla, mutta todelliset kokeellisesti mitatut tulokset

poikkeavat näistä vain vähän. Virherajan ollessa keskimäärin $\pm 0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$, ovat kaikki ennustetut arvot virherajojen sisällä.



Kuva 9. Tyhjiölasin U-arvot eri selektiivilasin emissiviteeteillä ja lukumäärillä (Fang et al. 2014, s. 486)

Kuvasta 9 nähdään, että mitä pienempi on selektiivilasin emissiviteetti, sitä pienempiä ovat sekä koko tyhjiölasin U-arvo että pelkän lasiosan U-arvo. Kahdella selektiivilasilla varustetun tyhjiölasin U-arvo on pienempi kuin yhdellä varustetun. Ero on kuitenkin pieni, kun selektiivilasien emissiviteetti on alle 0,04.

5.6 Tiivistheet

Ikkunan tiivistämistä voidaan pitää halvimpana energiansäästötoimena. Jos ikkunaa ei ole tiivistetty hyvin, lämpöä voi siirtyä ikkunan läpi ilmapuotojen mukana. (Mikkola & Böök 2011, s. 309) Tästä syystä tiivistämällä ikkuna, voidaan ikkunan U-arvoon saada huomattava parannus. Ilmaa vuotavat ikkunat aiheuttavat lämpöhukkaa ja vedon tunnetta. Hyvin tehdyllä tiivistyksellä voidaan pienentää huonetilan energiakuluja 5–20 %, mikä tarkoittaa huoneen lämpötilan nousua noin 1–2 °C:lla. (Laaksonen 2005, s. 10) Aiemmin tiivistämätöntä ikkunaa tiivistettäessä täytyy kuitenkin muistaa, että mikäli ilma on aiemmin vaihtunut ikkunan kautta, saattaa tiivistyksen jälkeen sisäilman kosteus nousta epäterveelliselle tasolle (Mikkola & Böök 2011, s. 309).

Kosteuden tiivistyminen ikkunalasin pintaan, eli lasin huurtuminen, on yleensä seurausta puutteellisesta tai väärin tehdystä tiivistyksestä. Ikkunan sisälasin huurtuminen sisäpinnastaan aiheutuu ikkunan läpi tulevasta kylmästä ulkoilmasta, joka jäädyttää sisäpintaa. Sisälasin sisäpinnan huurtuminen kertoo ikkunan huonosta lämmöneristävydestä

tai sisäpuutteen huonosta tiivistyksestä. Kosteuden tiivistyminen uloimman lasin ulkopintaan tietyissä sääolosuhteissa sitä vastoin kertoo ikkunan hyvästä lämmöneristäväydestä. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 28)

Jos ikkunan sisä- ja ulkopuitteessa käytetään samaa tiivistettä, tulee ulkopuitteen tiivisteeseen jättää tuuletusraot, jotta ilma pääsee vaihtumaan lasivälissä. Tuuletusraot voidaan tehdä esimerkiksi jättämällä tiivistämättä noin 5 cm ylhäältä ja 5 cm alhaalta. Toinen vaihtoehto on käyttää ulkopuitteessa vähemmän ilmatiivistä tiivistettä. (Mikkola & Böök 2011, s. 310)

Tiivisteet voidaan jakaa eri tiivistetyyppeihin materiaalin, kiinnitystavan ja profiilin mukaan. Tiivisteitä voidaan kiinnittää esimerkiksi liimaamalla tai naulaamalla ja osa tiivisteistä on itseliimautuvia. (KH 94-00162 1992, s. 2) Tyypillisiä tiivisteiden profiileja ovat O-, P-, ja V-tiivisteet (Laaksonen 2005, s. 22). Nimitykset kuvaavat usein tiivisteiden poikkileikkauksen muotoa. Tiivistetyypin valintaan vaikuttaa, kuinka tiivis lopputulos halutaan, tuleeko tiivisteiden kestää paljon ikkunan aukaisua ja sulkemista ja mikä on tiivisteiden sopivin kiinnitystapa kyseisessä ikkunassa. Tiivisteiden on säilytettävä joustavuutensa, jotta ne mukautuvat erikokoisiin rakoihin. Mitä suuremmissa puristuksissa tiiviste on, sitä parempi on sen ilmanpitävyys. (KH 94-00162 1992, s. 2)

Tiivisteitä valmistetaan monista materiaaleista, joista yleisimpiä ovat kumit ja muovit. Tiivisteiksi parhaita kumilaatuja ovat silikonikumi, eteenipropeenikumi (EPDM-kumi) ja kloropreenikumi. Kloropreenikumien kestävyys on näistä materiaaleista huonoin. (Mikkola & Böök 2011, s. 315) Silikonikumi tiivisteillä on hyvä säänkestävyys, ne säilyvät pitkään joustavina ja niillä on pieni sulkemisvastus. Hyvin tehdyn silikonikumitiivistyksen iän on arvioitu olevan 10–15 vuotta. EPDM-kumi tiivisteillä on hyvät kosteudenesto-ominaisuudet. Lisäksi ne kestävät hankausta ja kylmää ja säilyvät pitkään joustavina. EPDM-täyskumitiivistyksen ikä on noin 10–15 vuotta. Solukumit ovat yleensä lyhytikäisempiä kuin täyskumit ja EPDM-solukumitiivistyksen iän onkin arvioitu olevan 6 vuotta. (KH 94-00162 1992, s. 2–3)

Yleisin tiivisteissä käytetty muovi on polyvinyylikloridi (PVC), jota käytetään varsinkin laahustiivisteinä. (Mikkola & Böök 2011, s. 315) PVC-muovitiivisteet eivät sovi käytettäväksi kaikkien materiaalien kanssa. PVC-solumuovitiivisteet saattavat kuoleutua täysmuovisia nopeammin ja haurastua pakkasessa. PVC-muovitiivisteiden iäksi on arvioitu 8–10 vuotta. (KH 94-00162 1992, s. 3) Mikkolan ja Böökin (2011, s. 315) mukaan laahustiivisteissä käytetty, haihtumattomia pehmittimiä sisältävä PVC on uusista joustavista tiivistemateriaaleista pitkäikäisin, sillä käytössä on 40 vuotta sitten asennettuja tiivisteitä, jotka toimivat edelleen.

5.7 Sälekaihtimet

Perinteinen ja yksinkertainen tapa estää auringon lämpöenergian pääsy huonetilaan on käyttää sälekaihtimia. Sälekaihtimia voidaan käyttää eräänlaisina säätölaitteina, joiden avulla voidaan pienentää huonetilojen energiankulutusta. Kun sälekaihtimia pidetään suljettuina, parantavat ne ikkunan lämmöneristävyttä ja rajoittavat varsinkin kesäaikaan huonetilojen lämpenemistä auringon säteilyn vaikutuksesta. Yöksi suljetut sälekaihtimet pienentävät ikkunan läpi tapahtuvaa lämpöhäviötä. (Sundell 2004, s. 71) Kevättalvella, sälekaihtimien ollessa auki, on mahdollista lämmittää huonetiloja ilmaisella auringon lämpöenergialla (Hemmilä & Saarni 2001, s. 57).

Ikkunan lämmöneristävyden kannalta sälekaihtimet kannattaa sijoittaa mahdollisimman ulos, koska mitä pidemmälle auringon lämpösäteily pääsee ikkunassa, sitä enemmän sitä tulee sisälle asti. Koska sälekaihdinta ei kannata sijoittaa ikkunan ulkopuolelle, paras paikka sille on ikkunan uloimman lasin sisäpuolella. Tällöin sälekaihdin muodostaa suljettuna lasien väliin yhden eristävän ilmakerroksen lisää. (Hemmilä & Saarni 2001, s. 56) Sälekaihdin muodostaa siis teoriassa yhden lasin lisää, mutta vaikutus on kuitenkin pienempi.

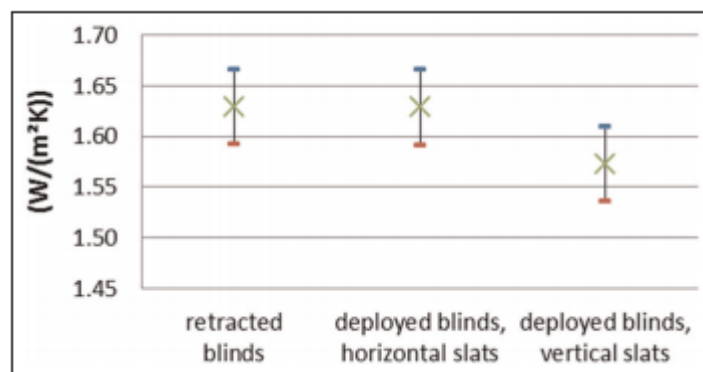
Säleen värillä on merkitystä kaihtimen auringonsuojaominaisuuksien kannalta. Vaaleat värit heijastavat tehokkaasti auringon lämpösäteilyä, kun taas tummat värit absorboivat säteilyä ja näin heikentävät suojaominaisuuksia. (Hemmilä & Saarni 2001 s. 56) Säleet voidaan myös päällystää vastaavalla materiaalilla kuin selektiivilasin pinta, jolloin sälekaihdin toimii selektiivilasin tavoin. Näiden selektiivisten sälekaihtimien säleiden alapinnat maalataan valkoisiksi. Lisäksi kaihdin on rakenteeltaan sellainen, että säleet sulkeutuvat tiivistä vähentäen ilmavirtauksia säleiden välissä. (Sundell 2004 s. 72) Taulukossa 1 on esitetty näiden kahden edellä mainitun kaihtimen vaikutukset eri ikkunatyyppien U-arvoihin.

Taulukko 1: Kaihtimien vaikutus eräiden 1,2 m * 1,2 m- kokoisten ikkunoiden U-arvoon (Hemmilä & Saarni 2001, s. 56; Sundell 2004, s. 72)

Kaihdin	Ikkunatyypit		
	MS	MSE	MSE+selektiivilasi+argon
Ei kaihdinta	2,44 W/m ² K	1,74 W/m ² K	1,13 W/m ² K
Maalattu valkoinen	2,05 W/m ² K	1,57 W/m ² K	1,06 W/m ² K
Selektiivipinnoitettu	1,68 W/m ² K	1,35 W/m ² K	0,95 W/m ² K

Taulukosta 1 nähdään, että sälekaihtimen parantava vaikutus ikkunan lämmönläpäisykertoimeen on sitä suurempi, mitä huonompi on ikkunan lämmönläpäisykerroin. Esimerkiksi kaksilasiseen MS-ikkunaan asennettu selektiivipinnoitettu kaihdin pienentää ikkunan U-arvoa kolmilasisen MSE-ikkunan tasolle. Näin suurta parannusta ei saada vastaavalla kaihtimella MSE-ikkunassa. Taulukon 1 arvoja tarkasteltaessa tulee huomioida ikkunan pinta-ala. Pienemmissä ikkunoissa sälekaihtimien vaikutus ikkunan lämmönläpäisykertoimeen on pienempi ja vastaavasti suuremmissa ikkunoissa suurempi (Hemmilä & Saarni 2001, s. 56).

Grynning et al. (2015) käsittelevät artikkelissaan tarkemmin sälekaihtimen vaikutusta eristyslasilla varustettujen MSE-ikkunoiden U-arvoon. Kuvan 10 kuvaajassa on esitetty alumiinilla päällystettyjen kaihtimien vaikutus ikkunan U-arvoon eri asennoissa.



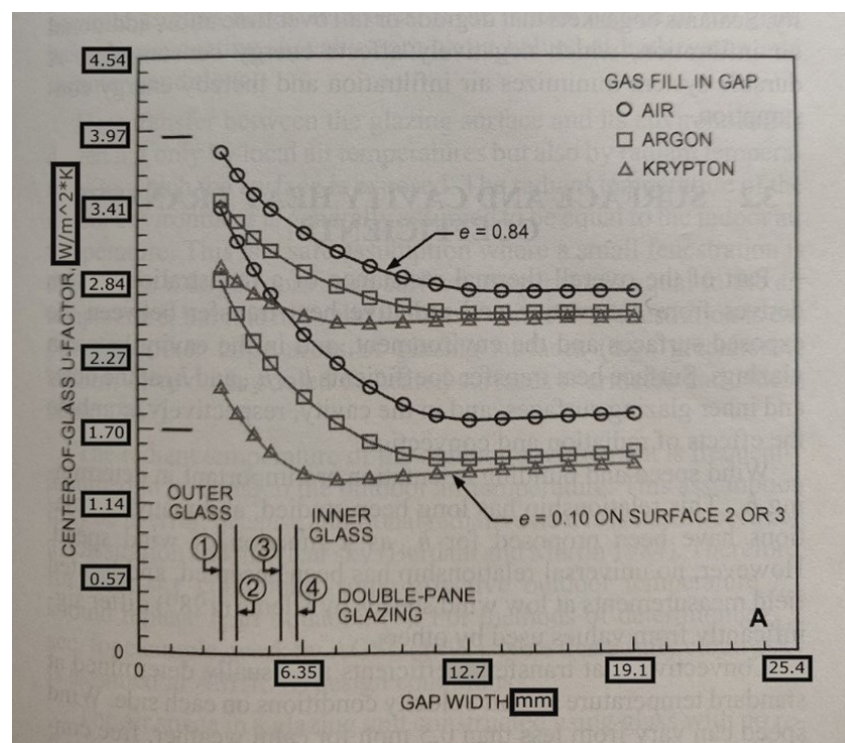
Kuva 10. Kaksilasisen MSE-ikkunan U-arvojen vaihteluvälit kaihtimien eri asennoissa (Grynning et al. 2005 s. 158).

Kuvan 10 kuvaajasta voidaan havaita, ettei ikkunan U-arvoon ole vaikutusta sillä, onko sälekaihtimet vedetty ylös vai ovatko ne alhaalla auki-asennossa. Kun kaihtimet suljetaan, ikkunan U-arvo laskee noin 4 % verrattuna ylös vedettyihin kaihtimiin (Grynning et al. 2005 s. 160). Suomessa yleisesti käytetyissä MSE-ikkunoissa sälekaihtimien vaikutus ikkunan U-arvoon jää lopulta siis hyvin vähäiseksi.

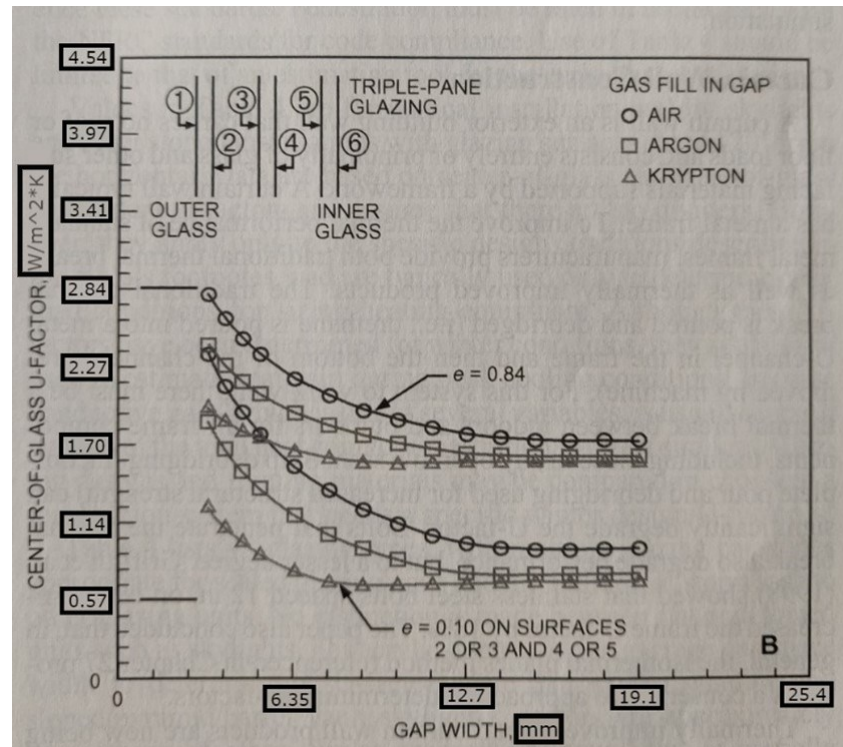
5.8 Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää millä erilaisilla keinolla voidaan vaikuttaa ikkunan U-arvoon. Ikkunan lämmöneristävyyteen voidaan vaikuttaa erilaisten materiaalivalintojen ja rakenteiden avulla. Tehokkaimmin ikkunan U-arvoa voidaan parantaa lisäämällä laseja. Laseja ei kuitenkaan ole kannattavaa lisätä loputtomiin, sillä kolmen lasin jälkeen ikkunan U-arvo ei enää parane merkittävästi. Toinen tehokas keino parantaa ikkunan U-

arvoa on käyttää ikkunassa eristyslasia. Tällaisessa eristyslaselementissä voidaan edelleen käyttää selektiivilasia ja täytekaasuna ilmaa paremmin lämpöä eristävää jalokaasua. Eristyslasin U-arvoon vaikuttavat lasien lukumäärä, lasivälin paksuus, täytekaasut ja selektiivipinnoitteet. Kuvissa 11 ja 12 on esitetty kuvaajat, joissa havainnollistetaan lasivälin vaikutus eristyslasin U-arvoon. Lisäksi kuvaajista nähdään eri täytekaasujen, ilman, argonin ja kryptonin, sekä selektiivilasin vaikutus eristyslasin U-arvoon. Selektiivilasin vaikutus näkyy kuvaajien alemmissä käyrissä, joissa on merkintä $e=0.10$, eli lasin emissiviteetti on 0,10. Kuvassa 11 eristyslasi koostuu kahdesta, ja kuvassa 12 kolmesta lasista. Kuvaajien vaaka- ja pystyakselien arvot on muokattu muuntokertoimien avulla vastaamaan Suomessa käytettyjä yksiköitä. Muokatut arvot ovat kuvissa rengastettuina.



Kuva 11. Kaksilasisen eristyslasin U-arvon käyttäytyminen (ASHRAE 2017, 15.5)



Kuva 12. Kolmilasisen eristyslasin U-arvon käyttäytyminen (ASHRAE 2017, 15.5)

Vertaamalla kuvien 11 ja 12 kuvaajia keskenään, voidaan nähdä, että eristyslasin U-arvo pienenee noin 1,0 W/m²K lisättäessä kaksilasiseen eristyslasiin kolmas lasi. Vaikutus on siis suuri. Tämä johtuu siitä, että mitä paksumpi eristyslaselementti on, sitä pidempi matka on lämpövirralla siirtyä elementin läpi (ASHRAE 2017, 15.5). Kuvien 11 ja 12 kuvaajista voidaan nähdä myös lasivälin optimietäisyys eri täytekaasuille.

Lisäksi kuvista 11 ja 12 nähdään, että suurempi parannus eristyslasin U-arvoon saadaan lisäämällä siihen selektiivipinnoite tai -pinnoitteet kuin korvaamalla ilma jalokaasulla. Selektiivilasi tai täytekaasu eivät yksin vaikuta merkittävästi ikkunan lämmöneristävyyteen, mutta yhdessä nämä ratkaisut parantavat ikkunan U-arvoa huomattavasti. Monen eri U-arvoon vaikuttavan tekijän yhteisvaikutuksen avulla saavutetaan siis merkittävin parannus eristyslasin U-arvoon.

Selektiivilasin vaikutus eristyslasin U-arvoon on selvästi suurin, kun käytetään täytekaasuna kryptonin kanssa eristyslasissa, vaikuttaa olevan potentiaalinen ratkaisu silloin, kun halutaan pitää lasiväli eristyslasissa mahdollisimman kapeana (ASHRAE 2017, 15.5).

Helpoin tapa vaikuttaa ikkunan lämmöneristävyyteen on pitää huolta, että ikkuna on tiivistetty oikein. Jos ikkunan tiivistyksessä on puutteita, pääsee lämpöä siirtymään ikku-

nan läpi ilmavuotojen mukana, mikä taas näkyy ikkunan U-arvossa. Sälekaihtimet toimivat eräänlaisina säätiminä, joiden avulla voidaan vaikuttaa huonetiloihin pääsevän auringon lämpösäteilyn määrään. Sälekaihtimien vaikutus ikkunan U-arvoon nykyään paljon käytetyissä kolmilasissa ikkunoissa jää kuitenkin hyvin vähäiseksi. Voidaankin ajatella, että tänä päivänä sälekaihtimet vaikuttavat lähinnä huonetilan viihtyvyyteen.

Tyhjiölasi on vielä vähän käytetty rakenne, mutta käytettäessä selektiivilaseja sen U-arvo on alle $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tästä syystä tyhjiölasi on potentiaalinen keino saada ikkuna vastaamaan lämmöneristävyydeltään Suomen U-arvovaatimuksia.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ikkunan lämmöneristävyyttä kuvataan U-arvolla. Suomessa U-arvovaatimus ikkunoille on nykyään $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Suomen tiukentuneet U-arvovaatimukset ikkunoille ovat aiheuttaneet sen, että uudisrakentamisessa lämpimien tilojen ikkunoissa on käytettävä lähes poikkeuksetta vähintään kolmea lasia. Ikkunan lämmöneristävyyttä parannettaessa lämpöhäviöt ikkunan kautta pienenevät. Kiristyneillä U-arvovaatimuksilla pyritään vähentämään huonetilojen lämmitysenergian kulutusta.

Uudisrakentamisessa tullaan tulevaisuudessa todennäköisesti käyttämään entistä energiatehokkaampia ikkunoita. Kun heti rakennuksen elinkaaren alussa panostetaan ikkunoiden lämmöneristävyyteen, voidaan rakennuksen käytön aikaisessa energian kulutuksessa säästää merkittävästi. Ikkunan U-arvoon vaikuttaa monta eri tekijää, mutta työn perusteella eristyslasi on ikkunan lämmöneristävyyden kannalta merkittävässä roolissa. Tästä syystä esimerkiksi kolmilasisella eristyslasilla varustetun MS3E-ikkunan käyttö perinteisen MSE-ikkunan sijaan voi parantaa rakennuksen energiatehokkuutta huomattavasti. Myös materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa ikkunan lämmöneristävyyteen. Voikin olla, että tulevaisuudessa ikkunoita valmistetaan yhä enemmän lämmöneristävyyden kannalta soveltuvammista materiaaleista. Kun lisäksi pidetään huolta, että ikkunaa huolletaan säännöllisesti, voidaan varmistaa sen lämpötekniinen toimivuus koko ikkunan käyttöajan ajan.

Tässä työssä keskityttiin ikkunan lämmöneristävyyteen. Ikkunan energiatehokkuus koostuu kuitenkin ikkunan läpi johtuvan lämpöenergian määrän lisäksi ikkunan läpi tulevasta auringonsäteilyn määrästä ja ikkunan ilmatiivyydestä. Energiatehokasta ikkunaa valittaessa ei siis riitä pelkän ikkunan U-arvon tarkastelu, vaan ikkunan lämmöneristävyyden lisäksi tulee tarkastella ikkunan g- ja L-arvoa. Tämän työn pohjalta voidaan siis valita hyvin lämpöä eristävä ikkuna, mutta energiatehokkaan ikkunan valinta edellyttäisi vielä jatkotutkimuksia aiheesta.

LÄHTEET

ASHRAE (2017). Handbook 2017, Fundamentals chapter 15, ASHRAE

Cuce, E., & Riffat, S. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 41, 695–714 p. Saatavissa (viitattu 23.3.2021): <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.084>

Evans, H. (2019). *How Buildings Work* (1st edition). RIBA Publishing.

Fang, Y., Hyde, T., Arya, F., Hewitt, N., Eames, P., Norton, B., & Miller, S. (2014). Indium alloy-sealed vacuum glazing development and context. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 37, 480–501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.029>

Gläser, H., & Ulrich, S. (2013). Condensation on the outdoor surface of window glazing — Calculation methods, key parameters and prevention with low-emissivity coatings. *Thin Solid Films*, 532, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.12.110>

Grynning, S., Misiopceki, C., Uvsløkk, S., Time, B., & Gustavsen, A. (2015). Thermal performance of in-between shading systems in multilayer glazing units: Hot-box measurements and numerical simulations. *Journal of Building Physics*, 39(2), 147–169. Saatavissa (viitattu 16.03.2021): <https://doi.org/10.1177/1744259114559924>

Hemmilä, K., & Heimonen, I. (2005). Suomalaisten ikkunoiden kestävyys, VTT Tiedotteita 2285, 73 s.

Hemmilä, K., & Heimonen, I. (1999). Eristyslasin täytekaasun ja lasien toimivuus ja toteaminen. VTT Espoo.

Hemmilä, K., Heimonen, I., & Saarni, R. (1999). Tulevaisuuden ikkunoiden kehitysvaiheet ja valinta. VTT Tampereen teknillinen korkeakoulu, s. 20–21.

Hemmilä, K., & Saarni, R. (2001). Ikkunaremontti. Rakennustieto Oy, 115 s.

Ikkunawiki, Ikkunoiden rakenne, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.02.2021): <https://www.ikkunawiki.fi/ikkunatyypit/ikkunoiden-rakenne/>

KH 94-00162 (1992). Ikkunoiden tiivistäminen, Rakennustietosäätiö, 5 s.

Laaksonen, M. (2005). Valoa ikkunoista. Alfamer, 158 s.

Lasilipponen, Eristyslasit, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.02.2021): <https://www.lasilipponen.fi/rakennus-ja-sisustuslasit/lasityypit/eristyslasit/>

Mikkola, J., & Böök, N., (2011). Ikkunakirja: perinteisen puuikkunan kunnostaminen. Kustannusosakeyhtiö Moreeni, 352 s.

Pilkington (2018). Lasifakta, 80 s. Saatavissa (viitattu 20.2.2021): https://www.pilkington.com/-/media/pilkington/site-content/finland/architects/0893_lasifakta2017_fi_1002.pdf

RakMk C4 (2003). Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Lämmöneristys. Ohjeet. Ympäristöministeriö, 24 s. Saatavissa (viitattu 5.02.2021): <https://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>

RakMk D3 (2012). Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö. 35 s. Saatavissa (viitattu 16.03.2021): https://www.finlex.fi/data/normit/37188/D3-2012_Suomi.pdf

RT 103241 (2020). Puu- ja puualumiini-ikkunat. Ominaisuudet ja laatuvaatimukset, asennus, huolto ja kunnossapito, Rakennustietosäätiö, 41 s.

RT 38-10941 (2008). Eristyslasit, Rakennustietosäätiö, 23 s.

SFS-EN ISO 10077-1 (2017). Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 1. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

SFS-EN ISO 10077-2 (2017). Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance. Part 2. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki.

Siikanen, U., (2014). Rakennusfysiikka: perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy. Helsinki, 256 s.

Sundell, K., (2004) Ikkunakäsikirja 2004. Rakennusteollisuus RT ry Puutuotetöimiala. 129 s.

1010/2017 (2017). Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Ympäristöministeriö. Helsinki. Saatavissa (viitattu 18.03.2021): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>