

# Tulevaisuuden ikkunoiden kehityspäruusteet ja valinta

Ismo Heimonen  
Kari Hemmilä

VTT Rakennustekniikka

Risto Saarni

Tampereen teknillinen korkeakoulu



ISBN 951-38-5430-2 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5431-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1999

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, telekopio 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, telefax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, telefax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1604, 02044 VTT,  
puh.vaihde (09) 4561, telekopio (09) 455 2408

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsfysik, hus- och brandteknik, Värmemansgränden 3, PB 1804, 02044 VTT,  
tel.växel (09) 4561, fax (09) 455 2408

VTT Building Technology, Building Physics, Building Services and Fire Technology, Lämpömiehenkuja 3, P.O.  
Box 1804, FIN-02044, Finland, phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Kerttu Tirronen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Heimonen, Ismo, Hemmilä, Kari & Saarni, Risto. Tulevaisuuden ikkunoiden kehityspäätökset ja valinta [Development basis and selection of future building windows]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1939. 50 s.

**Avainsanat** windows, residential buildings, office buildings, heat transmission, heat transfer, thermal transmittance, thermal insulation, dimensioning

## TIIVISTELMÄ

Raportissa on esitetty ikkunan lämmönläpäisyn ja säteilynläpäisyn parantamisen vaikutukset asuinpuolelta ja toimistorakennuksen energiakustannuksiin. Tiedot ovat apuvälineenä määritettäessä hyötyjä, joita ikkunan ominaisuuksien parantamisella voidaan saavuttaa. Tutkimuksessa on otettu huomioon ikkunoiden energiavaikutukset sekä lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoitusvaikutukset. Lisäksi on selvitetty näiden seikkojen kustannusvaikutukset ja eri lämmön-eristystason ikkunoiden taloudellinen kannattavuus.

Raportissa on esitelty nykyisellä teknologialla saavutettavat ikkunoiden lämpötekniset ominaisuudet sekä keinot, joilla ikkunan lasiosaa, karmia ja puitetta voidaan parantaa. Keinoja ovat selektiiviset pinnoitteet, täytekaasut, lasien lukumäärä, lasiväljen optimointi sekä karmi- ja puiteratkaisun rakenteelliset keinot ja materiaalivalinnat.

Tiivistetysti esitetään myös ikkunateknologiassa käytettävien uusien materiaalien ja ratkaisujen, mm. aerogelien, valoa läpäisevien eristeiden, tyhjölasiin ja sähkökromaattisen lasin, lämpöteknisiä ominaisuuksia ja arvioidaan tämän teknologian kannattavuutta Suomen olosuhteissa.

Ikkunan parantamisen energiakustannusvaikutukset kertovat kuluttajalle, kuinka paljon paremmasta tuotteesta kannattaa maksaa, kun pelkät energiakustannussäästöt otetaan huomioon. Vastaavasti ikkunavalmistaja saa tietoa siitä, miten suuri tuotteen parantamisen lisähinta saa olla arvioitaessa lämmöneristävyydeltään erilaisten ikkunoiden elinkaarikustannuksia. Raportissa kuvataan ikkunavalinnan työkalu, jolla edellä mainittuja kustannusarvioita pystytään tekemään säävyöhykke- ja rakennuskohtaisesti eri ikkunatyypeille. Projektissa kehitetyn ikkunavalintaohjelman tarkoituksena on edistää uusien energiaa säästävien ikkunoiden käyttöä.

Heimonen, Ismo, Hemmilä, Kari & Saarni, Risto. Tulevaisuuden ikkunoiden kehityspärusteet ja valinta [Development basis and selection of future building windows]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1939. 50 p.

**Avainsanat** windows, residential buildings, office buildings, heat transmission, heat transfer, thermal transmittance, thermal insulation, dimensioning

## ABSTRACT

This report presents the effects of improving the thermal and solar energy transmittance of the window in residential and office buildings. This information can be used as a tool, when assessing the benefits of window improvements. The energy and dimensioning effects (heating and cooling power) of the window selection were taken into account in this study. The cost effects and the economical viability of the selection were studied.

The report presents the thermal performance of the window technology used in Finnish markets and the solutions to improve the glazing and frame. The most common solutions are based on selective coatings, gas fillings in insulated glass units, increasing the number of panes and optimizing the width of the gas gap. The frame and sash properties can be improved by structural and material selections.

The report gives an overview of the possibilities of the new technologies: the energetic properties of new materials, e.g. aerogels, transparent insulation materials, evacuated glazing and electrochromic glazing has been evaluated from the point of view of Finnish cold climate.

The effect of the window selection on the energy costs gives the information, how much the additional price of the product can be, if the selection is based on the energy cost savings. On the other hand, the manufacturer gets the information, what is the reasonable additional price for better products, while assessing the life cycle costs of products having different thermal transmittances. This report describes the simple tool suitable for rough estimation of the window selection in residential and office buildings in Finnish climate. The aim of this tool is to improve the dissemination of the new energy saving windows in Finnish markets.

# ALKUSANAT

Tämä on Rakennusten energiankäytön tutkimusohjelman RAKET (1993-1998) projektin “Tulevaisuuden ikkunan kehitys” loppuraportti. Siinä on kuvattu projektin keskeiset tulokset ja listattu projektin aikana tuotettu kirjallinen aineisto, joka tarkentaa näitä tuloksia.

Tutkimuksen kokonaistavoitteena oli kehittää ratkaisumallit Suomen olosuhteisiin sopivalle termisesti ja optisesti optimaaliselle ikkunalle. Tutkimuksessa selvitettiin ikkunan lämmönläpäisyn ja säteilynläpäisyn parantamisen vaikutukset asuinpientalon ja toimistorakennuksen energiakustannuksiin sekä paremman ikkunan synnyttämien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoitussäästöjen vaikutukset ikkunavalinnan kannattavuuteen. Projektin osatavoitteena oli tuottaa ikkunateollisuudelle soveltuvaa tietoa ikkunaratkaisujen markkinoinnin tueksi. Projekti osallistui Kansainväliseen IEA Task 18 -projektiin (Advanced glazings and associated materials for solar and building applications).

Projekti rahoittajina toimivat Teknologian Kehittämiskeskus (TEKES), osallistuvat yritykset sekä VTT Rakennustekniikka. Projektiryhmään kuuluivat tutkijat Ismo Heimonen (projektipäällikkö), Kari Hemmilä ja Jari Shemeikka VTT Rakennustekniikasta sekä Risto Saarni TTKK:n Rakentamistalouden laitokselta. Projektin toteutukseen ja ohjaukseen osallistuivat lisäksi Jukka Vahtila Fenestra Oy:stä, Ossi Vähäsalo Optiplan Oy:stä, Harto Helpinen Arkkitehtuuritoimisto Helpinen Ky:stä sekä osatehtävään “Ikkunavalintatyökalun kehittäminen“ Markku Hopppania Wirebo Oy:stä, Hannu Hautanen Ikkunatehdas Hautanen Oy:stä, Osmo Laitila Tiivi Oy:stä ja Jorma Tiiri Metsäpuu Oy:stä.

Raportin kirjoittamisesta vastasivat Ismo Heimonen ja Kari Hemmilä sekä Risto Saarni (luvut 4 ja 5). Raportissa kuvatun ikkunavalintatyökalun ohjelmoinnista vastasi Jari Shemeikka.

Projektiryhmä kiittää kaikkia tutkimukseen osallistuneita.

Espoo, joulukuussa 1998

Ismo Heimonen

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä .....	3
Abstract .....	4
Alkusanat .....	5
1 JOHDANTO .....	7
2 IKKUNATEKNOLOGIAN NYKYTILA .....	8
2.1 NYKYTEKNIKALLA SAAVUTETTAVA LASIOSA .....	10
2.2 KARMI- JA PUITEOSAN NYKYTILA JA KEHITYSPERIAATTEET .....	13
3 TULEVAISUUDEN RATKAISUT .....	17
3.1 Täytekaasut ja pinnoitteet .....	17
3.2 Aerogeelit .....	18
3.3 Tyhjölasi .....	19
3.4 Valoaläpäisevät eristeet .....	21
3.5 Sähkökromaattiset lasit .....	24
3.5.1 Sähkökromaattisen lasin kannattavuus Suomen ilmastossa .....	24
3.6 Sähkölämmitteinen ikkuna .....	26
3.7 Ikkunan ja ilmanvaihdon integrointi .....	29
3.7.1 Raitisilmaventtiili ikkunan karmi- tai puiteosassa .....	29
3.7.2 Tuloilmaikkuna .....	30
3.7.3 Poistoilmaikkuna .....	30
4 IKKUNAVAIHTOEHTOJEN KANNATTAVUUS .....	32
4.1 Ikkunan valinta asuinpientalossa .....	34
4.2 Ikkunan valinta toimistorakennuksessa .....	35
5 IKKUNOIDEN EKOLOGISUUS .....	37
5.1 Ikkunan karmi- ja puitemateriaali .....	37
5.2 Ikkunan lasiosa .....	38
5.3 Ikkunan purku ja kierrätys .....	39
6 TALOUDELLISEN IKKUNAVAIHTOEHDON VALINTAOHJELMA .....	41
7 YHTEENVETO .....	45
LÄHDELUETTELO .....	47
PROJEKTIN AIKANA TUOTETTU KIRJALLINEN MATERIAALI .....	49

# 1 JOHDANTO

Suomessa on aikaisemmissa ikkunatutkimuksissa (mm. ETRR-tutkimusohjelma) keskitytty ikkunan lämmöneristävyyden parantamiseen. Lämmönläpäisykertoimen (U-arvo) pienentämisessä ollaan jo varsin pitkällä. Markkinoilla on jo ikkunoita, joiden U-arvo on noin  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja lasiosan U-arvo jopa alle  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ikkunatarkasteluja ei kuitenkaan ole tehty kokonaisenergiatarkasteluna, jossa otetaan huomioon ikkunan ominaisuuksien vaikutus valaistukseen ja valaistusoloihin sekä viihtyisyyteen.

Ikkunan rooli rakennuksen energiajärjestelmässä on muuttumassa passiivisesta rakennusosasta aktiiviseksi, ja säteilynläpäisyn hallinta tulee tärkeäksi. Ikkunan ominaisuudet voivat olla säädettävissä tai itsestään säätyviä. Lämpöteknisesti optimaalisen ikkunan lämmönläpäisykerroin on mahdollisimman pieni lämmitystilanteessa, ja säteilynläpäisyominaisuudet muuttuvat lämmitys- tai jäähdystehontarpeen mukaan. Optimaalinen ikkuna koostuu karmirakenteesta, välilistoista, lasista ja pinnoitteista, jotka on koottu oikealla tavalla ikkunakokonaisuudeksi. Lisäksi ikkunamateriaalin säteilynläpäisyominaisuuden säätö tulee liittää rakennuksen säätöjärjestelmään. Säätyvien ikkunoiden hyödyntäminen on kannattavinta jäähdytetyissä toimistorakennuksissa, jolloin ikkunan avulla voidaan hallita jäähdytyskuormia.

Ikkunaa tulee tarkastella rakennuksen kokonaisenergiatarkastelun avulla, jolloin huomioidaan ratkaisun vaikutukset kokonaisenergiankulutukseen, tehontarpeeseen sekä termiseen ja visuaaliseen viihtyisyyteen. Myös lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien mitoittamiseen voidaan vaikuttaa ikkunavalinnan kautta.

Uuden ikkunateknologian tutkimusta varten käynnistettiin tutkimusprojekti "Tulevaisuuden ikkunan kehittäminen". Projektin tavoitteena oli kehittää ratkaisumallit Suomen olosuhteisiin sopivalle termisesti ja optisesti optimaaliselle ikkunalle. Ikkunaa tarkastellaan kokonaisenergiatarkastelulla, jolloin huomioidaan vaikutukset kokonaisjärjestelmän mitoittamiseen, energiankulutukseen, kustannuksiin sekä termiseen ja visuaaliseen viihtyisyyteen. Kokonaisenergiatarkastelut tehtiin nykyisille kaupallisille ikkunoille sekä tulevaisuuden teknologiaratkaisuille, mm. sähkökromaattiselle lasille. Ikkunoiden ekologiset valintaperusteet selvitettiin.

Tutkimus toteutettiin osaksi laskennallisena tarkasteluna simulointiohjelmilla ja osaksi kokeellisina laboratoriomittauksina. Ikkunateollisuus voi hyödyntää projektin tuloksia tuotekehityksessään. Tuloksia voidaan hyödyntää matalaenergiarakennusten suunnittelussa ja koerakentamisessa. Projekti osallistui kansainväliseen IEA Task 18 (Advanced Glazing Systems) -projektiin.

Tässä raportissa esitetään tutkimuksen päätulokset tiivistettynä sekä listataan (s.50-) projektin aikana tuotettu kirjallinen aineisto.

## 2 IKKUNATEKNOLOGIAN NYKYTILA

Taulukossa 1 on listattu Suomen rakennuskannan yleisimmät avautuvat ikkunat. Kaksilasinen kaksipuitteinen ikkuna (ylin) voi olla rakenteeltaan myös sellainen, että ulkopuite avautuu ulos ja sisäpuite sisään. Näillä molemmilla lämpötekniset arvot ovat likimäärin yhtäsuuret. Kaksilasisia ikkunoita käytettiin 1970-luvun puoliväliin saakka, jolloin lämmöneristävyysvaatimukset muuttuivat niin, että määräysten täyttäminen edellytti kolmen lasin käyttöä.

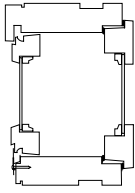
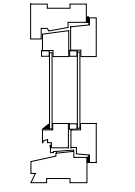
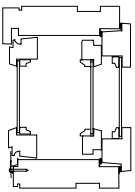
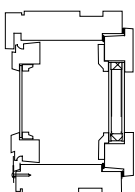
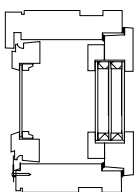
Aluksi kolmilasiset ikkunat olivat pääasiassa taulukossa kolmannella rivillä olevia kolmipuitteisia MSK-ikkunoita. Lyhenne MSK tarkoittaa moduulimitoitettua kolmilasista sisäänaukeavaa ikkunaa. Nykyisin suurin osa myytävistä ikkunoista on taulukon neljännellä rivillä olevia MSE-ikkunoita. Lyhenne MSE tarkoittaa moduulimitoitettua sisäänaukeavaa eristyslasi-ikkunaa.

Taulukon alimmalla rivillä on esitetty kolmilasisella eristyslasilla varustettu MSE-ikkuna. Eristyslasin keskimäinen lasi voi olla myös toiselta tai molemmilta puolilta selektiivisellä pinnoitteella pinnoitettu muovikalvo (HeatMirror -kalvo). Lämmöneristysmielessä molemmat eristyslasityypit toimivat samalla tavoin. Lasien tai kalvon pinnoitteen ominaisuudet ratkaisevat ikkunan lämmöneristävyuden ja muut lämpötekniset ominaisuudet. Kolmilasisella eristyslasilla varustetun MSE-ikkunan lämmöneristävyys on 20 - 30 % parempi kuin kaksilasisella eristyslasilla varustetun MSE-ikkunan lämmöneristävyys.

Suomen rakentamiskokoelman osa C3 edellyttää, että lämpimän tilan ikkunan lasiosan U-arvo saa olla enintään  $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Lausuntokierroksella olevassa uudessa määräyksessä on esitetty vaatimus  $1,2 \text{ m} * 1,2 \text{ m}$  kokoisen ikkunan keskimääräiselle U-arvolle, joka luonnoksen mukaan saa olla enintään  $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Taulukko 1. Erilaisten 1,2 m \* 1,2 m kokoisten puikkunoiden likimääräinen lämmönläpäisykerroin. Siihen vaikuttavat lasien (tai kalvon) emissiviteetti, lasien välinen etäisyys, eristyslasin täytekaasu ja välilista sekä puitemateriaali.

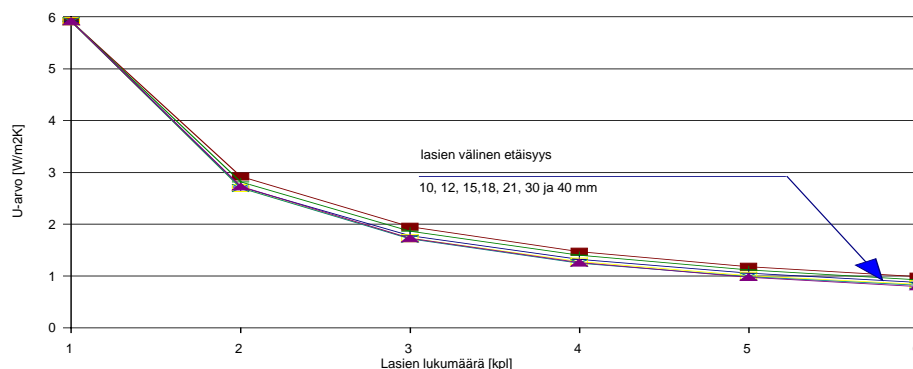
Ikkunan rakenne	lasiosa	Täytekaasu	Lämmönläpäisykerroin	
			Ikkuna keskimäärin (W/m <sup>2</sup> K)	Lasin keskiosa (W/m <sup>2</sup> K)
	2 * kirkas	-	2,4 - 2,8	2,80 - 2,90
	2 * kirkas	-	2,5 - 2,9	2,70 - 2,80
	3 kirkas	-	1,65 - 1,80	1,70 - 1,80
	2 kirkas + 1 selektiivi	-	1,30 - 1,40	1,30 - 1,40
	3 kirkas	ilma	1,70 - 1,90	1,80 - 1,95
	2 kirkas + 1 selektiivi	ilma	1,30 - 1,55	1,10 - 1,50
		argon	1,15 - 1,40	0,95 - 1,35
		krypton	1,10 - 1,35	0,85 - 1,10
	1 kirkas + 2 selektiivi	ilma	1,25 - 1,50	1,00 - 1,40
		argon	1,10 - 1,35	0,90 - 1,25
krypton		1,05 - 1,30	0,80 - 1,00	
	4 kirkas	ilma	1,25 - 1,45	1,30 - 1,40
	3 kirkas + 1 selektiivi	ilma	1,10 - 1,30	0,90 - 1,25
		argon	1,00 - 1,25	0,75 - 1,10
		krypton	0,90 - 1,15	0,70 - 0,95
	2 kirkas + 2 selektiivi	ilma	0,90 - 1,20	0,70 - 1,05
		argon	0,75 - 0,95	0,55 - 0,90
krypton		0,70 - 0,90	0,45 - 0,75	

1) Eristyslasin keskimäinen lasi voi olla myös pinnoitettu muovikalvo, nk. HeatMirror -kalvo.

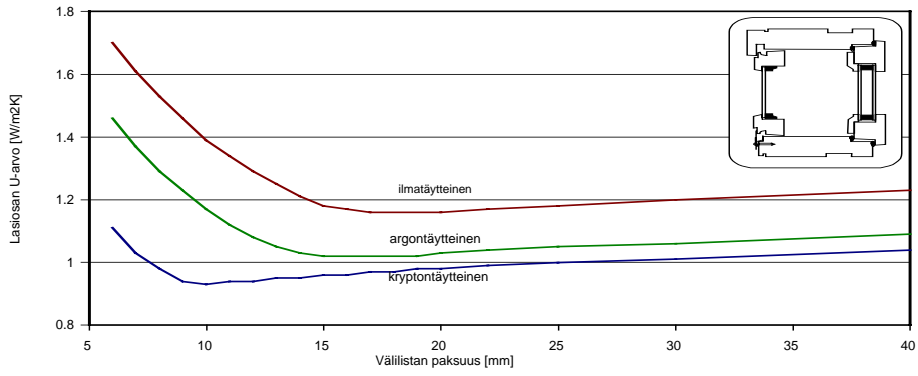
## 2.1 NYKYTEKNIKALLA SAAVUTETTAVA LASIOSA

Ennen lasien pinnoitusteknologian kehittymistä ikkunoiden lämmöneristävyyteen voitiin vaikuttaa vain lasien määrällä. Vasta pinnoitetun lasin tulo markkinoille on mahdollistanut ikkunan lasiosan lämmöneristävyyden parantamisen aikaisempaa huomattavasti paremmalle tasolle. Kuvasta 1 voidaan havaita, että lasien määrän lisääminen yli neljän ei ole järkevää, sillä saavutettava hyöty on sen jälkeen hyvin pieni. Ikkunassa ei kannata muutenkaan käyttää yli neljää lasia kustannus-, paino- ja läpinäkyvyssyistä.

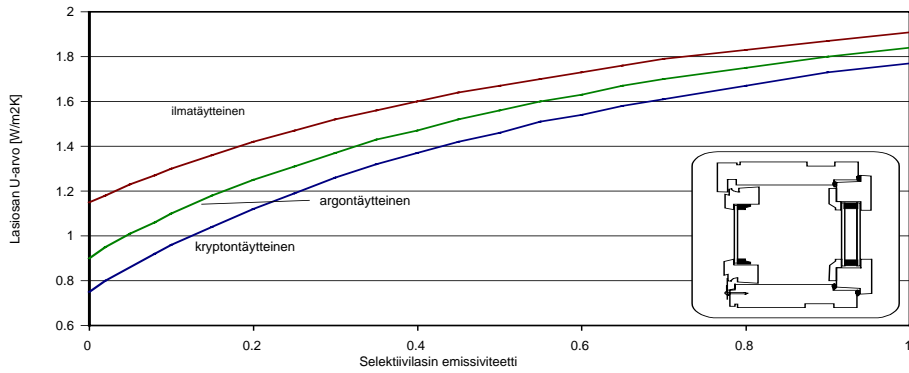
Kuvissa 2 ja 3 on esitetty yhdellä selektiivilasilla varustun MSE-ikkunan lasiosan U-arvon riippuvuus eristyslasin välistän leveydestä, täytekaasusta ja selektiivilasin emissiviteetistä. Kuvista voidaan havaita, että lasiosan U-arvon vaihteluväli on tyypillisesti 0,95 - 1,3 W/m<sup>2</sup>K. Mikäli halutaan paremmin lämpöeristävä lasirakenne, eristyslasiin tulee asentaa kolmas lasi, joka on pinnoitettu myös selektiivisellä pinnoitteella. Kuvissa 4 ja 5 vastaavat käyrät kolmilasisella eristyslasilla varustetulle ikkunalle. Näistä voidaan havaita, että lasiosan U-arvon vaihteluväli on tyypillisesti 0,5 - 1,0 W/m<sup>2</sup>K.



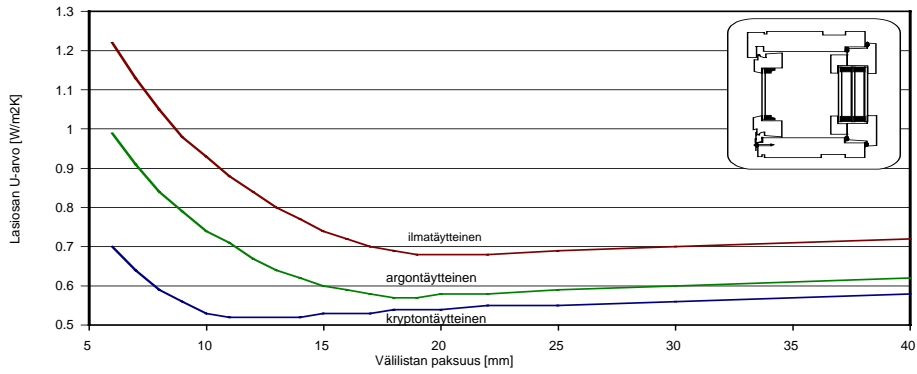
Kuva 1. Pinnoittamattomien 3 mm:n lasien määrän ja niiden välisen etäisyyden vaikutus lasiosan lämmöneristävyyteen.



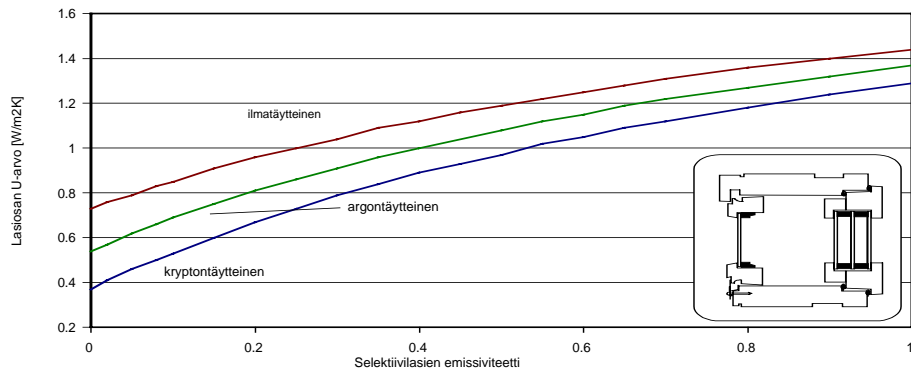
Kuva 2. Eristyslasin väliistan leveyden ja täytekaasun vaikutus yhdellä selektiivilasilla (emissiviteetti  $\varepsilon = 0,09$ ) varustetun MSE-ikkunan lasiosan lämmöneristävyyteen.



Kuva 3. Emissiviteetin vaikutus yhdellä selektiivilasilla varustetun MSE-ikkunan lasiosan lämmöneristävyyteen. Väliistan leveys on 12 mm.

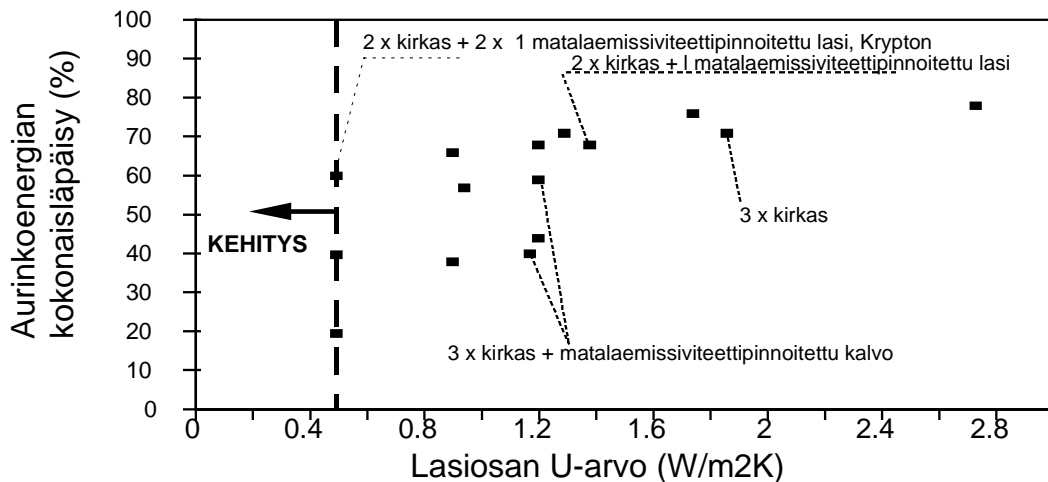


Kuva 4. Eristyslasin välilistan leveyden ja täytekaasun vaikutus kolmilasisella eristyslasilla ja kahdella selektiivilasilla (emissiviteetti  $\varepsilon = 0,09$ ) varustetun MSE-ikkunan lasiosan lämmöneristävyyteen.



Kuva 5. Emissiviteetin vaikutus kolmilasisella eristyslasilla ja kahdella selektiivilasilla varustetun MSE-ikkunan lasiosan lämmöneristävyyteen. Väliistan leveys on 12 mm.

Kuvassa 6 on esitetty markkinoilla olevien ikkunoiden lasiosan U-arvoja ja aurinkoenergian läpäisysuhteita.



Kuva 6. Markkinoilla olevien ikkunoiden lasiosan lämmöneristävyyksiä ja aurinkoenergian läpäisy-suhteita.

Nykyisellä teknologialla voidaan valmistaa lämmöneristävyydeltään  $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  olevia lasiosia. Tämä taso saavutetaan esimerkiksi neljällä lasilla, joista kahdessa on matalaemissiviteettipinnoite ( $\epsilon = 0,04$ ) ja kaksi on pinnoittamaton. Kahdessa lasivälissä on krypton-kaasutäyttö.

## 2.2 KARMI- JA PUITEOSAN NYKYTILA JA KEHITYSPERIAATTEET

Tavallisilla laseilla varustetuissa ikkunoissa puinen karmi ja puitteet ovat lämmöneristävyydeltään paremmat kuin lasiosa. Puuikkunan karmi- ja puiteosan keskimääräinen U-arvo on  $1,3 - 1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Selektiivilaseilla varustetuissa ikkunoissa tilanne on päinvastoin. Tämä asia on havaittavissa taulukosta 1, jossa kaksi- ja kolmilasisten ikkunoiden keskimääräinen U-arvo on pienempi kuin lasin keskiosan U-arvo. Selektiivilaseilla varustetuissa ikkunoissa lasin keskiosan U-arvo on pienempi.

Eri osatekijöiden vaikutusta ikkunan lämmöneristävyyteen tutkittiin laskennallisesti tietokoneohjelmilla FRAME ja WINDOW. Lähtökohdaksi valittiin kaksi MSE-ikkunaa, joista toisessa on yhdellä selektiivilasilla varustettu kaksilasinen eristyslasi ja toisessa kahdella selektiivilasilla varustettu kolmilasinen eristyslasi. Eristyslasin täytekaasuna on argon. Ikkunan ulkopuite ja karmen ulkopinta ovat alumiinia. Ikkunoista tutkittiin seuraavien tekijöiden vaikutusta:

- puun lämmönjohtavuus
- välilistan materiaali
- eristyslasin asennussyvyys
- sisäpuitteen paksuus
- ulkopuitteen materiaali
- lämmöneriste karmissa ja puitteessa sekä lämmöneristeen paksuus.

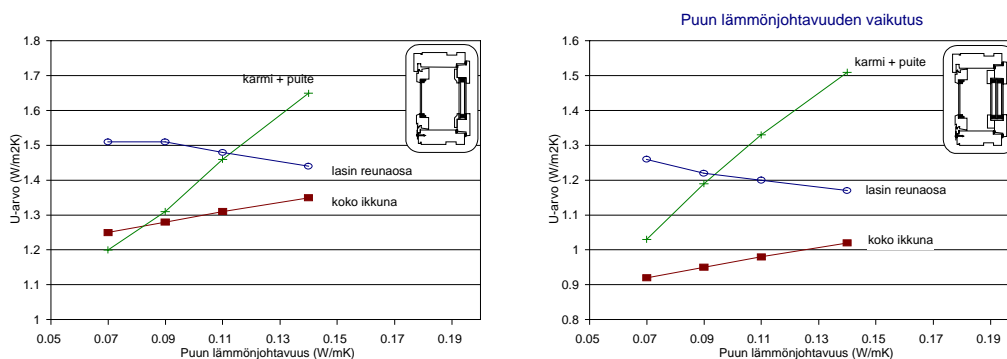
Laskennan tulokset on esitetty taulukoissa 2 ja 3 sekä kuvissa 7 - 9. Näistä nähdään, että suurin vaikutus on puun lämmönjohtavuuden pienentämisellä, lämmöneristeellä ja lämpöä eristävällä välilistalla. Eristyslasin upottamisella puitteeseen ja sisäpuiteen puuprofiilin paksuntamisella on vain pieni vaikutus. Samoin tuloksista on havaittavissa, että karmin ja puitteen lämmöneristävyuden parantamisella on sitä suurempi hyöty, mitä parempi on lasiosan lämmöneristävyys. Puun lämmönjohtavuuteen voidaan vaikuttaa puun lämpökäsittelyllä sekä vähäisessä määrin puulajin valinnalla.

*Taulukko 2. Eri tekijöiden vaikutukset alumiinisella ulkopuitteella, yhdellä selektiivilasilla (K-lasi, emissiviteetti  $\varepsilon=0,16$ ) ja argon-kaasulla varustetun 1,2 m \* 1,2 m kokoisen MSE-ikkunan lämmöneristävyys.*

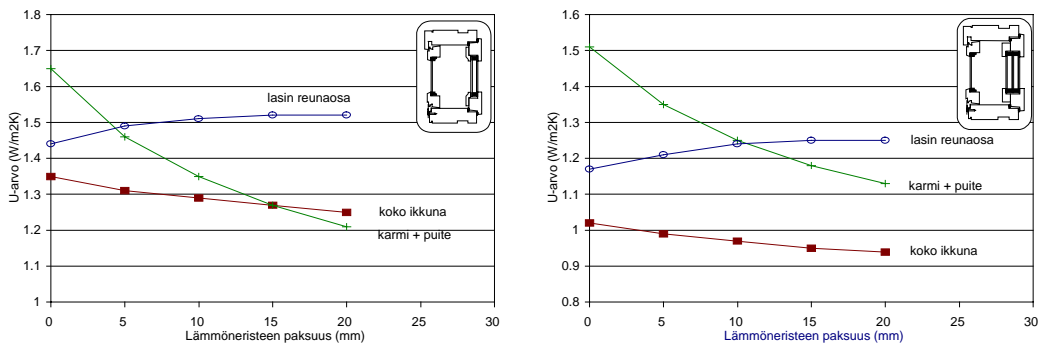
Ikkunaan tehdyt muutokset verrattuna perusikkunaan	U-arvo (W/m <sup>2</sup> K)			
	koko ikkuna	karmi + puite	lasin reunaosa	lasin keskiosa
Perusikkuna: MSE + K-lasi + argon+ ulkopuite alumiinia	1,35	1,65	1,44	1,20
Puun lämmönjohtavuus = 0.11 W/m <sup>2</sup> K	1,31	1,46	1,48	1,20
Puun lämmönjohtavuus = 0.09 W/m <sup>2</sup> K	1,28	1,31	1,51	1,20
Puun lämmönjohtavuus = 0.07 W/m <sup>2</sup> K	1,25	1,20	1,51	1,20
SuperSpacer-välilista	1,28	1,51	1,23	1,20
Muovivälilista	1,27	1,49	1,21	1,20
SwiggleStrip-välilista	1,33	1,61	1,38	1,20
Umpiolasi 3 mm syvemällä	1,34	1,65	1,38	1,20
Umpiolasi 6 mm syvemällä	1,33	1,65	1,33	1,20
Umpiolasi 9 mm syvemällä	1,33	1,64	1,30	1,20
Umpiolasi 12 mm syvemällä	1,32	1,63	1,27	1,20
Sisäpuite 5 mm paksumpi	1,35	1,63	1,43	1,20
Sisäpuite 10 mm paksumpi	1,34	1,61	1,42	1,20
Sisäpuite 15 mm paksumpi	1,33	1,59	1,41	1,20
Sisäpuite 20 mm paksumpi	1,33	1,57	1,41	1,20
Sisäpuite 25 mm paksumpi	1,32	1,56	1,40	1,20
Ulkopuite puuta	1,28	1,47	1,29	1,20
Karmissa ja sisäpuitteessa 5 mm PUR	1,31	1,46	1,49	1,20
Karmissa ja sisäpuitteessa 10 mm PUR	1,29	1,35	1,51	1,20
Karmissa ja sisäpuitteessa 15 mm PUR	1,27	1,27	1,52	1,20
Karmissa ja sisäpuitteessa 20 mm PUR	1,25	1,21	1,52	1,20

Taulukko 3. Eri tekijöiden vaikutukset alumiinisella ulkopuitteella, kahdella selektiivilasilla (K-lasi, emissiviteetti  $\epsilon=0,16$ ), kolmilasisella eristyslasilla ja argon-kaasulla varustetun 1,2 m \* 1,2 m kokoisen MSE-ikkunan lämmöneristävyyteen.

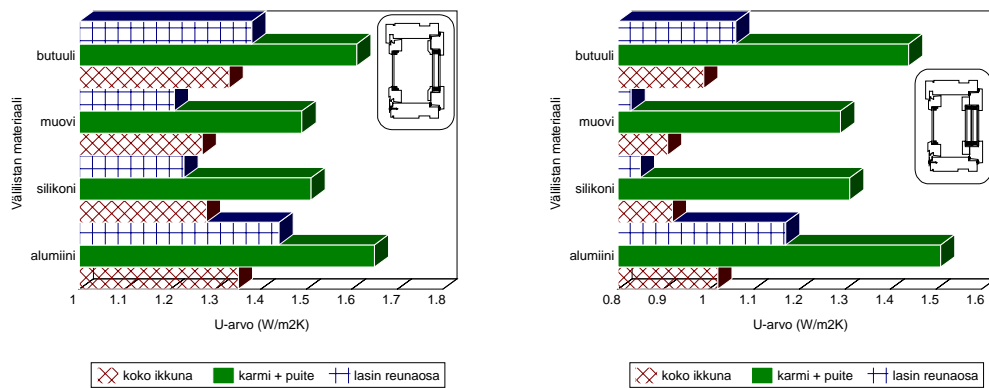
Ikkunaan tehtyt muutokset verrattuna perusikkunaan	U-arvo (W/m <sup>2</sup> K)			
	koko ikkuna	karmi + puite	lasin reunaosa	lasin keskiosa
Perusikkuna: MSE + 2 K-lasia + argon + alumiininen ulkopuite	1,02	1,51	1,17	0,76
Puun lämmönjohtavuus = 0.11 W/m <sup>2</sup> K	0,98	1,33	1,20	0,76
Puun lämmönjohtavuus = 0.09 W/m <sup>2</sup> K	0,95	1,19	1,22	0,76
Puun lämmönjohtavuus = 0.07 W/m <sup>2</sup> K	0,92	1,03	1,26	0,76
SuperSpacer-välilista	0,92	1,31	0,85	0,76
Muovivälilista	0,91	1,29	0,83	0,76
SwiggleStrip-välilista	0,99	1,44	1,06	0,76
Umpiolasi 3 mm syvemällä	1,01	1,52	1,09	0,76
Umpiolasi 6 mm syvemällä	1,00	1,52	1,05	0,76
Umpiolasi 9 mm syvemällä	1,00	1,52	1,00	0,76
Umpiolasi 12 mm syvemällä	0,99	1,51	0,96	0,76
Sisäpuite 5 mm paksumpi	1,02	1,49	1,16	0,76
Sisäpuite 10 mm paksumpi	1,01	1,47	1,15	0,76
Sisäpuite 15 mm paksumpi	1,01	1,46	1,15	0,76
Sisäpuite 20 mm paksumpi	1,00	1,45	1,14	0,76
Sisäpuite 25 mm paksumpi	1,00	1,44	1,13	0,76
Ulkopuite puuta	0,96	1,36	1,05	0,76
Karmissa ja sisäpuitteessa 5 mm PUR	0,99	1,35	1,21	0,76
Karmissa ja sisäpuitteessa 10 mm PUR	0,97	1,25	1,24	0,76
Karmissa ja sisäpuitteessa 15 mm PUR	0,95	1,18	1,25	0,76
Karmissa ja sisäpuitteessa 20 mm PUR	0,94	1,13	1,25	0,76
20 mm:n PUR ja SuperSpacer	0,81	0,87	0,89	0,76



Kuva 7. Ikkunan puumateriaalin lämmönjohtavuuden vaikutus koko ikkunan ja sen osien U-arvoon.



Kuva 8. Karmissa ja sisäpuiteessa olevan PUR-lämmöneristeen vaikutus koko ikkunan ja sen osien U-arvoon.



Kuva 9. Eristyslasin välilistan vaikutus koko ikkunan ja sen osien U-arvoon.

Koko ikkunan lämmöneristävyyden parantaminen on helpointa tehdä lasiasaa parantamalla. Lasivalinnalla, eristyslasin välilistavalinnalla ja täytekaasujen käytöllä voidaan vaikuttaa useita kymmeniä ikkunan keskimääräiseen lämmönläpäisykertoimeen. Karmi- ja puiteosan parantaminen perinteisin keinoin (puun dimensiot, lämmönjohtavuus, lämpökotot, lasiosan upotus puitteeseen) vaikuttaa huomattavasti vähemmän koko ikkunan lämmöneristävyyteen, koska luonnollisesti karmi- ja puiteosan pinta-ala on pieni koko ikkunan pinta-alaan nähden.



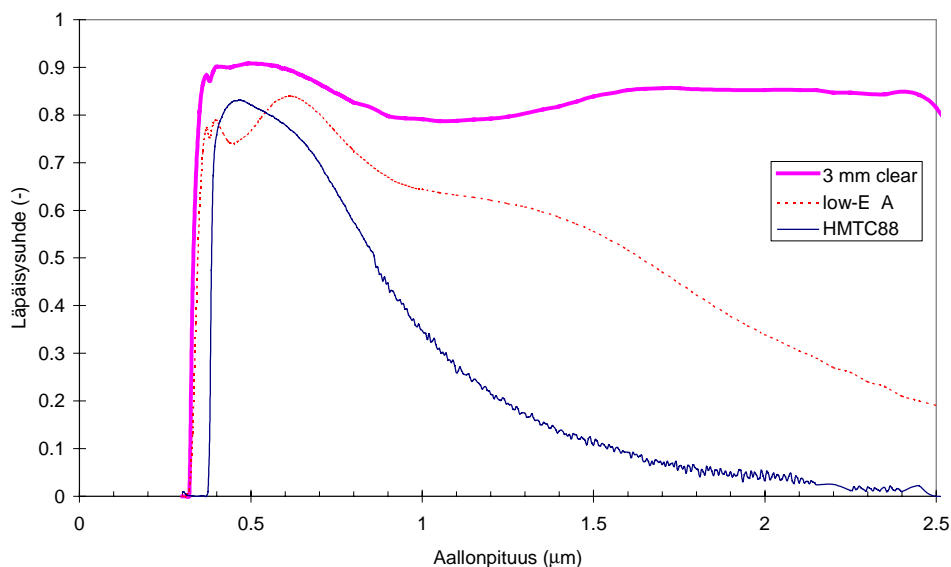
## 3 TULEVAISUUDEN RATKAISUT

Uusia ratkaisuja ikkunateknologiassa ovat mm. entistä pienemmän emissiviteetin lasitusratkaisuun perustuvat ikkunat, aerogeeli-ikkunat, tyhjölasis ja kromaattiset lasit / 3/. Kolme ensin mainittua pyrkivät kohti parempaa lämmöneristävyyttä, viimeisellä ratkaisulla taas vaikutetaan lasituksen säteilynläpäisyominaisuuksiin.

### 3.1 TÄYTEKAASUT JA PINNOITTEET

**Selektiivipinnoitteet** ovat tämän päivän ikkunavalmistuksessa helpoimmin sovellettavaa uutta teknologiaa. Hyvin lämpöä eristävät lasitukset tehdään matala-emissiviteettipinnoitetuista lasista (1 tai useampi matalaemissiviteettipinnoitettu), joiden pinnalla oleva alhaisen emissiviteetin omaava metalli- tai metallioksidipinnoite heijastaa lasien välistä pitkäaaltoista lämpösäteilyä vähentäen näin säteilylämmönsiirtoa. Matalaemissiviteettipinnoitteet voivat sijaita lasin tai muovikalvon pinnalla. Mitä pienempi emissiviteetti pinnoitteella on, sitä paremmin estetään säteilylämmönsiirtoa. Pienimmät emissiviteetit, joita lasivalmistajat ilmoittavat ovat jopa 0,04. Yhdessä pinnoitetekniikan kanssa voidaan käyttää **täytekaasuja**, kuten argonia ja kryptonaa. Selektiivipinnoitteet ja täytekaasut ovatkin jo yleisesti käytössä lähes kaikilla eristyslasivalmistajilla.

Eri pinnoitetyypit läpäisevät eri tavoin auringon säteilyä eri aallonpituusalueilla. Kuvassa 10 on esitetty kirkkaan 3 mm lasin, erään matalaemissiviteettipinnoitetun lasin ja matalaemissiviteettipinnoitetun kalvon HMTTC88 spektrinen läpäisyysuhde (materiaalitiedot WINDOW 4.0 -ohjelmasta). Kuvasta huomataan, että näkyvän valon aallonpituusalueella 380 - 780 nm läpäisyysuhde on kaikilla ratkaisulla 75 - 90 %. Kalvo leikkaa säteilynläpäisyä aallonpituusalueella alle 380 nm ja lasit alueella alle 320 nm.



Kuva 10. Kirkkaan 3 mm lasin, erään matalaemissiviteettipinnoitetun lasin ja matalaemissiviteettipinnoitetun kalvon HMTTC88 spektrinen läpäisyysuhde.

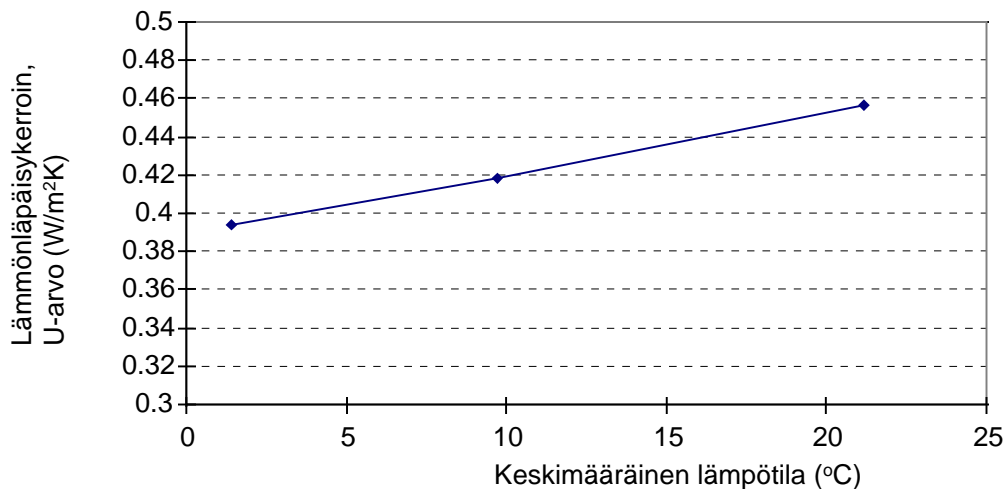
## 3.2 AEROGEEELIT

**Aerogeelit** ovat mikrohuokoista silikaattivaahtoa, jonka huokoskoko on noin 10 - 20 nm. Materiaalilla pyritään hyvään lämmöneristävyyteen ja korkeaan valonläpäisyyn (/ 17/, / 18/, / 19/). Valonläpäisyn lisäksi vaatimuksena voidaan pitää myös mahdollisimman pientä valon hajontaa, jotta materiaalin läpi näkyvät esineet eivät vääristy tai näy usvamaisina hahmoina.

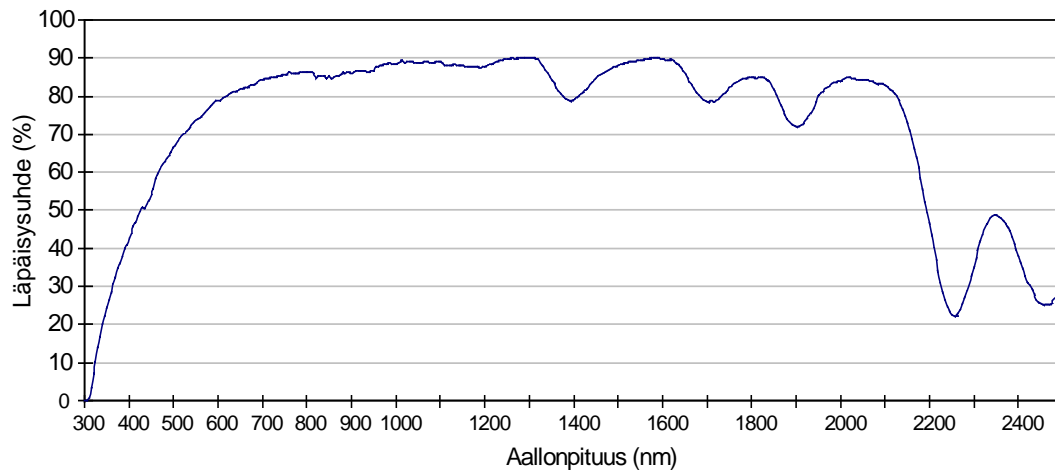
Aerogeelit ovat herkkiä kosteudelle ja vaurioituvat joutuessaan kontaktiin nestemäisen veden kanssa. Vetolujuudeltaan ne ovat heikkoja, mutta puristuslujuudeltaan vahvoja. Niinpä ne soveltuvatkin käytettäväksi lasien välissä. Materiaalin lämmönjohtavuus on noin 0,015 - 0,020 W/mK ilmakehän paineessa. Lämmönjohtavuutta voidaan alentaa tyhjiöimällä. Alle 100 mbar:n paineessa lämmönsiirto rakenteessa tapahtuukin pääasiassa johtumalla ja säteilemällä. Lämmönjohtavuus alenee tällöin noin 0,01 W/mK:iin / 18/. Suuri onteloiden suhteellinen osuus rakenteessa johtaa pieneen tiheyteen (tyypillisesti noin 150 kg/m<sup>3</sup>). Pieni huokoskoko aiheuttaa pienillä aallonpituusalueilla valon hajontaa.

Materiaalia valmistetaan kahdessa muodossa: levymäisenä (monolithic) ja raemaisena (granular). Levymäinen hajoaa helposti ja eikä suuria kokoja pystytä valmistamaan. Nykyiset prototyypiversiot ovat kooltaan maksimissaan 60 x 60 cm<sup>2</sup>.

IEA Task 18 projektissa selvitettiin mittauksin erään prototyypiversioiden lämmön- ja säteilyläpäisyominaisuudet, kuvat 11 ja 12 / 19/. Aerogeeli-lasipaketti (50 x 50 cm<sup>2</sup>) koostui 20 mm:n aerogeelilevystä kahden lasin välissä. Reunatiivistys oli rakennettu muovilaminaatista, butyylistä ja silikonista. Aerogeeli-lasipaketin mitattu lämmönläpäisykerroin on 0,42 W/m<sup>2</sup>K (koekappaleen keskimääräinen lämpötila on 10 °C). Auringonsäteilyn läpäisyosuus on 75 % ja näkyvän valon 74 %. Tulokset osoittavat, että hyvä lämmöneristävyys voidaan saavuttaa pienellä materiaalipaksuudella (20 mm) ja että valonläpäisyosuus on edelleen korkea.



Kuva 11. Aerogeeli-ikkunan lämmönläpäisykerroin (U-arvo). Lämpövirtalevyllä mitattuun lämpövastukseen on laskennallisesti lisätty pintavastukset / 19/.



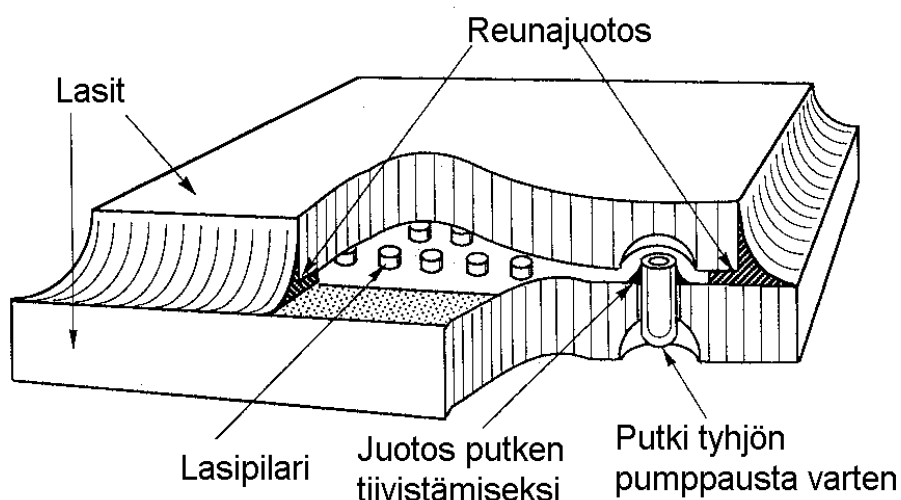
*Kuva 12. Aerogeli-ikkunan spektrinen säteilyläpäisysuhde. Näkyvän valon alueella (380 - 780 nm) läpäisysuhde on 40 - 85 %. Silmän herkkyyssäilyällä painottamalla näkyvän valon läpäisysuhteeksi saadaan 74 % / 19/.*

### 3.3 TYHJÖLASI

**Tyhjölasi**tekniikalla (/ 6/, / 20/, / 21/, / 22/) on mahdollista myös saavuttaa hyvä lämmöneristävyys lasiosalla. Kahden lasin väliin imetään tyhjö, jolloin lasien välissä ei ole kaasua, jossa lämpö siirtyisi johtumalla tai konvektiolla. Lasien väliin joudutaan kuitenkin lisäämään lasikuulia tai -pilareita, jolloin johtuminen kuulien kautta voi edelleen olla 40 % kokonaislämmönsiirrosta lasiosan läpi. Kahdella lasilla saavutetaan U-arvotaso 0,9 W/m<sup>2</sup>K / 6/. Edelleen kahdella tyhjölasiilla voidaan siis saavuttaa alle 0,5 W/m<sup>2</sup>K lämmöneristävyys.

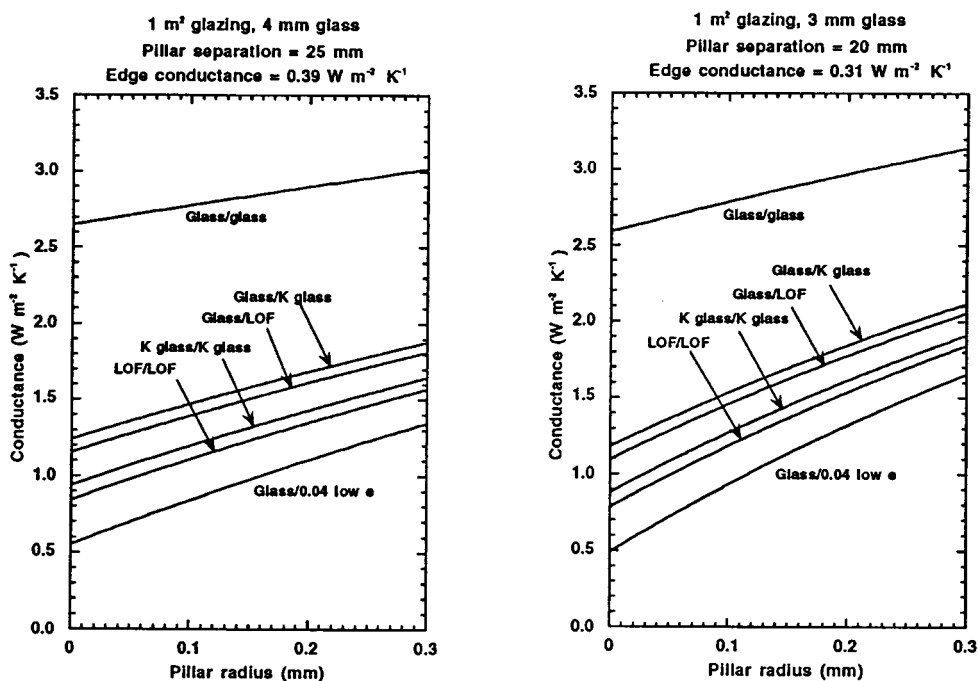
Tyhjölasiin kehitystyön haasteena on ollut useita käytännön ongelmia mm. lasien reunaosan tiiviys, tyhjiön pysyminen elementissä koko ikkunan eliniän, pinnoitteiden ominaisuuksien säilyminen tyhjölasiin valmistusprosessissa sekä rakenteen kestävyys ilmakehän paineessa sekä kestävyys suuren lämpötilaeron vaikuttaessa lasien välillä.

Yhden neliömetrin suuruisia tyhjölaseja on valmistettu Sydneyn yliopistossa Australiassa (kuva 13).



Kuva 13. Periaatekuva tyhjölasiesta, joka on valmistettu Sydneyn yliopistossa. Lasien reunat on liitetty yhteen lasijuotoksella 500 °C lämpötilassa. Lasien keskiosat pidetään erossa toisistaan lasipilareilla (halkaisija 0,3 - 0,6 mm), joiden välimatka on 20 - 25 mm / 20/.

Tyhjölasin lämmöneristävyyteen vaikuttavat oleellisesti lasin emissiviteetti sekä lasipilareiden koko ja määrä. Käytännön ratkaisuissa, joissa kestävyysongelmat on ratkaistu, lasiosan U-arvo on 1,2 - 3,0 W/m<sup>2</sup>K riippuen lasin emissiviteetistä (Kuva 14). Nykyisillä kovapinnoitteisilla lasilla (emissiviteetti 0,15 - 0,2) saavutetaan U-arvo 1,2 W/m<sup>2</sup>K. Mikäli pinnoitteita pystytään parantamaan, U-arvo 0,5 W/m<sup>2</sup>K on saavutettavissa.



Kuva 14. Lasiratkaisun ja lasipilarien koon vaikutus tyhjölasin lämmönläpäisykertoimeen / 20/.

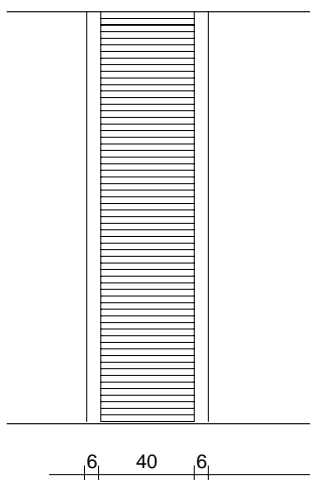
Tyhjölasiä valmistustekniikka on kehittynyt niin pitkälle, että riittävän suuria ikkunakokoja voidaan jo valmistaa. Japanissa on kehitetty ensimmäinen kaupallinen tyhjölasiutuote / 21/. Sydneyn yliopiston suunnittelemaa konstruktiota on muutettu massatuotantoon ja Japanin ikkunamarkkinoille paremmin soveltuvaksi. Rakenne on tehty sellaiseksi, että ratkaisua voidaan käyttää myöskin korjausrakentamisessa vaihtamalla tavallinen lasi tyhjölasiin.

### 3.4 VALOALÄPÄISEVÄT ERISTEET

**Valoa läpäiseviä eristeitä**, esimerkiksi erilaisia kennomaisia tai pillimäisiä muovimateriaaleja, voidaan myös käyttää ikkunoissa. Tällöin pyritään yleensä suureen näkyvän valon läpäisyyn ja matalaan U-arvoon. Ratkaisut soveltuvat tapauksiin, joissa haetaan erilaista visuaalista vaikutelmaa, esimerkiksi halutaan paljon valoa sisään, mutta ei haluta suoraa näköyhteyttä ulos.

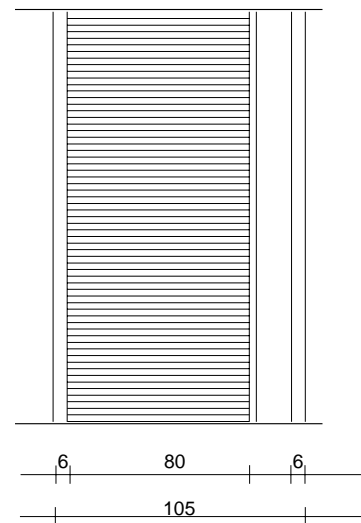
Esimerkkejä valoa läpäisevistä eristeistä ovat Arel- ja Okalux -polykarbonaattikennot. Arel on polykarbonaattikennoa, jota voidaan lisätä ikkunan lasien väliin. Okalux taas on valoa läpäisevää eristettä, joka on rakennettu ikkunaan. Okaluxiin on valmistajalla komponentteja julkisivujärjestelmän kiinnitykseen. Kuvassa 15 on esitetty periaatekuvat kahden Okalux-elementin lasiosasta.

Okalux 1



Kapilux A1-D-40-Float 6-Float 6-  
1,2 x 1,2 m

Okalux 2



Kapilux A1-K-80-Float 6-Float 6-  
1,2 x 1,2 m

*Kuva 15. Kahden Okalux-elementin lasiosan rakenne.*

Polykarbonaattikennon lämmöneristävyys lasien välissä sekä säteilynläpäisyominaisuudet selvitettiin mittauksin. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty Arelilla sekä Okaluxilla saavutetut lämmöneristävytydet / 1/, / 2/. Arel on mitattu lämpövirtalevyomenetelmällä, Okalux on mitattu hot-box -kammiossa ikkunaan.

Taulukon 4 lämpövastukset ovat koekappaleen pinnasta pintaan mitattuja, joten U-arvoa määritettäessä pintavastukset tulee huomioida. Jos pintavastusten summaksi oletetaan 0,17 W/m<sup>2</sup>K, U-arvoiksi saadaan 50 mm lasitetulle Arel-ikkunalle 1,36 W/m<sup>2</sup>K ja 100 mm paksulle lasitetulle ikkunalle 0,87 W/m<sup>2</sup>K.

*Taulukko 4. Lämpövastus ja näennäinen lämmönjohtavuus kahdella lasilla pinnoitetulle Arel-elementille (Arelin paksuus 50 tai 100 mm). Mittaukset on tehty vaaka- sekä pystyasennossa.*

Koekappale	Mittaus vaaka-asennossa		Mittaus pystyasennossa	
	lämmön- vastus R (m <sup>2</sup> K/W)	näennäinen lämmön- johtavuus λ (W/mK)	lämmön- vastus R (m <sup>2</sup> K/W)	näennäinen lämmön- johtavuus λ (W/mK)
3 mm lasi+ 50 mm AREL + 3 mm lasi	0,565	0,103	0,568	0,102
3 mm lasi + 100 mm AREL + 3 mm lasi	0,971	0,112	0,977	0,112

*Taulukko 5. Kahden Okalux-elementin lämmönläpäisykertoimet, mitattu hot-box-kammiossa.*

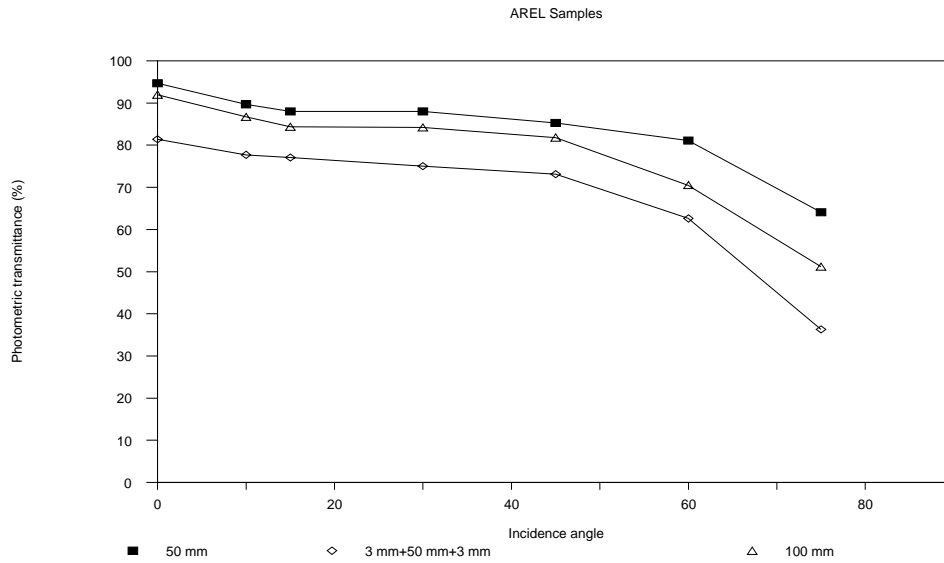
Sample	U (W/m <sup>2</sup> K)
OKALUX 1 (40 mm)	1,71
OKALUX 2 (80 mm)	1,36

Okalux-ikkunan lämmöneristävyystaso voidaan saavuttaa esimerkiksi yhden selektiivilasin käytöllä. Okaluxin tapauksessa alumiininen karmiosa huonontaa lämmöneristävyyttä merkittävästi.

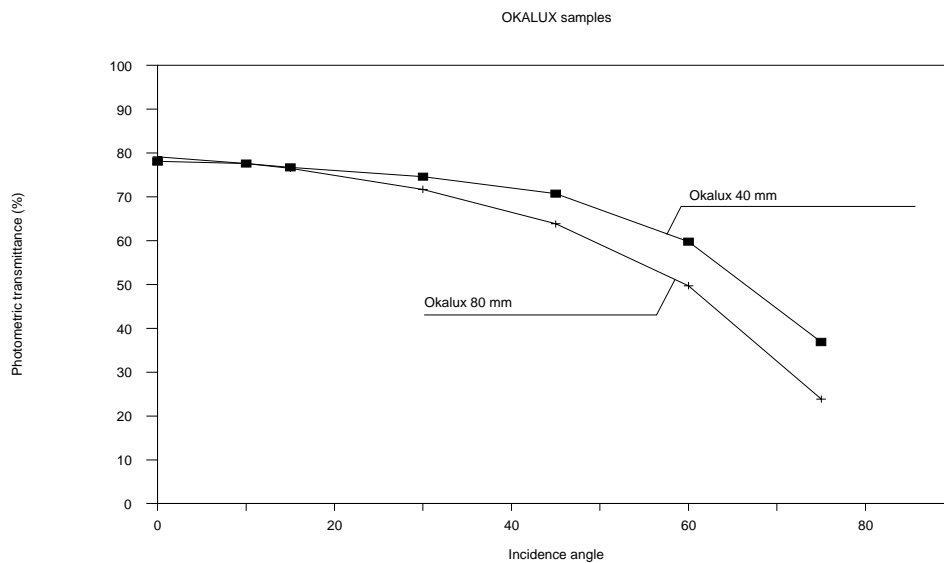
Valoa läpäisevät eristeet eivät aina ole välttämättä hyviä ratkaisuja pyrittäessä hyvään lämmöneristävyYTEEN. Eri ratkaisujen näennäiset lämmönjohtavuudet seuraavia suuruusluokkia:

- polykarbonaattikennot noin 0,06 - 0,1 W/mK.
- aergeelit 0,01-0,03 W/mK.
- 1 selektiivipinnoite (e=0,04), 15 mm ilmaväli 0,03 W/mK.
- 1 selektiivipinnoite (e=0,04), 12 mm Krypton-kaasua 0,015 W/mK.

Arelin valonläpäisy suhde on yli 90 % kohtisuoralle valolle. Kuvassa 16 on esitetty 50 ja 100 mm Arelin ja 3 mm laseilla pinnoitetun 50 mm Arelin näkyvän valon läpäisy suhteet säteilyn tulokulman funktiona / I/. Kuvassa 17 on esitetty vastaavat Okalux-ikkunoiden lasiosalle / 2/.



Kuva 16. 50 ja 100 mm Arelin ja 3 mm lasella pinnoitetun 50 mm Arelin näkyvän valon (A-valo) läpäisysuhteet säteilyn tulokulman funktiona.



Kuva 17. Kahden Okalux-ikkunan lasiosan näkyvän valon (A-valo) läpäisysuhteet säteilyn tulokulman funktiona.

Arel- ja Okalux-näytteiden läpäisysuhteet on mitattu aallonpituuden funktiona, joten suoran auringonsäteilyn läpäisysuhteet on laskettavissa spektrisestä läpäisykäyrästä. Okalux-ikkunoiden auringonsäteilyn läpäisysuhteet on esitetty taulukossa 6.

*Taulukko 6. Okalux-ikkunoiden suoran auringonsäteilyn spektrisestä läpäisysuhdekäyristä lasketut läpäisysuhteet. Laskelmat on tehty painottaen läpäisysuhdekäyrän eri aallonpituuden arvoja CEN prEN410 ja ASTM 891 painokertoimilla.*

Kappale, tulokulma	CEN prEN410	ASTM 891
Okalux 1 (40 mm), 10° tulokulma	62,6	60,5
Okalux 2 (80 mm), 10° tulokulma	62,5	60,2
Okalux 1 (40 mm), 60° tulokulma	45,1	42,6

CEN prEN410 -standardiluonnoksen painokertoimet antavat hieman suuremman auringonsäteilyn läpäisysuhteen kuin ASTM 891 -standardin mukaiset painokertoimet. Esimerkiksi WINDOW4.0 -ohjelma käyttää ASTM-painokertoimia ikkunoiden säteilyn läpäisyominaisuuksien laskemisessa.

### 3.5 SÄHKÖKROMAATTISET LASIT

Säädettävillä ikkunoilla (switchable window, smart window) on muuttuvat optiset tai termiset ominaisuudet. Säätävää materiaalia sanotaan kromogeeniseksi (chromogenic materials). Kromogeenisyyttä on kolmen tyyppistä: Sähkökromaattisen lasin (electrochromic glazing) optiset ominaisuudet muuttuvat jännitteen muuttuessa, lämpökromaattisen lasin (thermochromic glazing) lasin lämpötilan muuttuessa ja valokromaattisen lasin (photochromic glazing) säteilyn voimakkuuden muuttuessa. Ikkunan läpäisyominaisuudet muuttuvat korkeasta läpäisykerroimesta (kirkas tila) matalaan (värillinen tila).

Komponenttitason ominaisuustietoa säädettävistä ikkunoista on vaikea saada. Teknologia on prototyyppiasteella ja läpäisyominaisuuksien spektrijakaumatietoja ei julkaista. Tämän vuoksi optiset ominaisuudet idealisoidaan rajoittumaan maksimi- ja minimi ominaisuuksien välille. Lähestymistapaa voidaan käyttää rakennuksen energia- ja päivänvalolaskennassa arvioitaessa uuden teknologian mahdollisuuksia.

Lämpökromaattinen lasi muuttaa on-off -tyyppisesti tilaansa tietyssä lämpötilassa. Sähkökromaattisen lasin ominaisuuksia voidaan säätää rakennuksen tai ympäristön tilan perusteella. Ikkunaa voidaan säätää yhdessä valaistuksen kanssa. Päivänvalon valaistusvoimakkuuden kasvaessa pienennetään ikkunan läpäisykerrointa. Kun ikkuna tila on kirkas ja valaistusvoimakkuus ei ole riittävä, säädetään keinovalolla sopiva valaistusvoimakkuus. Läpäisyominaisuuksia voidaan säätää myös lämpötilan, kuormitustilanteen tai jonkin laitteen toiminnan mukaan.

#### 3.5.1 Sähkökromaattisen lasin kannattavuus Suomen ilmastossa

Säädettävän ikkunan toimintaa Suomen olosuhteissa on tarkasteltu simuloinnein etelävyöhykkeen toimistotilassa / 9/. Ikkunan U-arvo on 2,5 W/m<sup>2</sup>K (lasiosan 2,58 W/m<sup>2</sup>K). Auringon kokonaisenergian läpäisysuhde on säädettävissä 0,16 - 0,49. Vastaavasti näkyvän valon läpäisysuhde on 0,10 - 0,66. U-arvo oletetaan vakioksi läpäisysuhteen muuttuessa. Ikkunan pinta-ala on 2,88 m<sup>2</sup> / toimistohuone (10 m<sup>2</sup>).

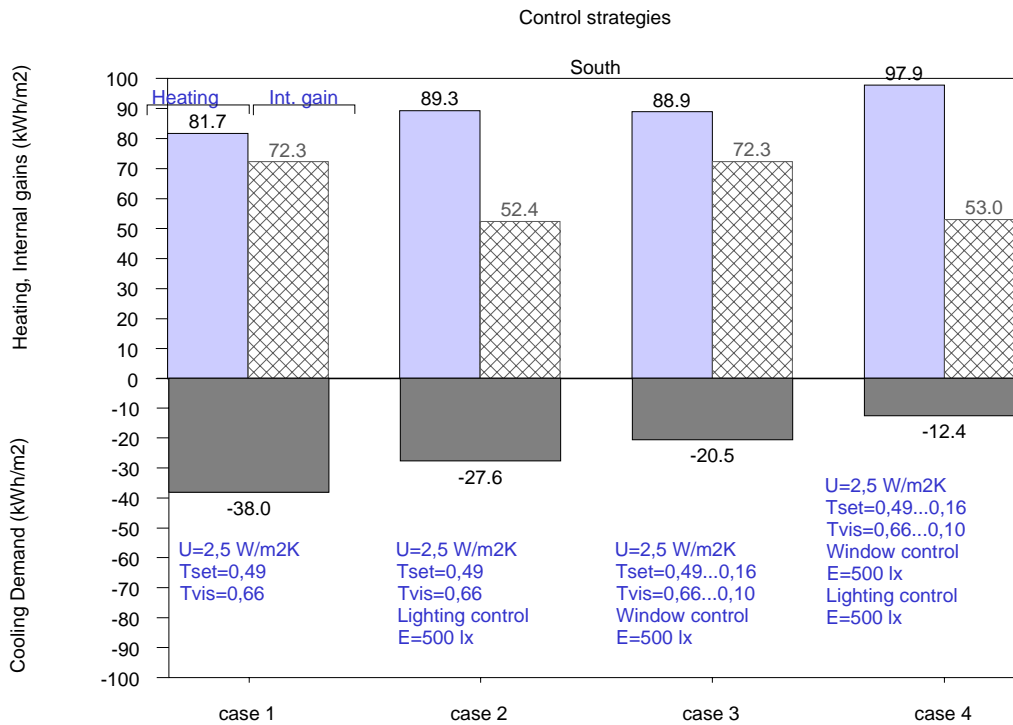


Ikkunan ja valaistuksen säätötavat ovat seuraavat:

1. Ikkunan ominaisuudet vakiot, valaistus klo 8-16 (145 W/toimistohuone)
2. Ikkunan ominaisuudet vakiot, valaistusta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella) klo 8-16, asetusarvo 500 lx (max. 145 W/toimistohuone)
3. Ikkunan läpäisysuhdetta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella, asetusarvo 500 lx), valaistus klo 8-16 (145 W/toimistohuone).
4. Ikkunan läpäisysuhdetta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella, asetusarvo 500 lx), valaistusta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella) klo 8-16, asetusarvo 500 lx (max. 145 W/toimistohuone)

Tapausten energiakustannukset on laskettu energian hinnoilla: lämmitys 0,15 mk/kWh, jäädytys 0,45 mk/kWh (jäädytyksen kylmäkerroin COP=3) ja sähkö 0,45 FIM/kWh. Kuva 18 esittää neljän valon- ja ikkunansäätötavan energiavaikutukset. Vertailu tapausten 1 ja 2 välillä osoittaa valaistuksen säädön energiansäästöpotentiaalin toimistorakennuksessa. Sähkölaitteiden vuotuinen energiankulutus laskee 72,3 kWh/m<sup>2</sup>:sta 52,4 kWh/m<sup>2</sup>:een (ero -19,9), jäädytysenergian kulutus laskee 38,0 kWh/m<sup>2</sup>:sta 27,6 kWh/m<sup>2</sup>:een (ero -10,4) ja lämmitysenergian tarve kasvaa 81,7 kWh/m<sup>2</sup>:sta 89,3 kWh/m<sup>2</sup>:een (ero +7,6). Edellä esitetyillä energian hinnoilla energiakustannusero tapausten 1 ja 2 välillä on 9,4 mk/m<sup>2</sup>(lattiapinta-ala).

Vertailu tapausten 1 ja 3 välillä osoittaa auringonsäteilyn ja näkyvän valon läpäisyn säädön vaikutuksen vuotuisen lämmitys- ja jäädytysenergian kulutukseen. Jäädytysenergian kulutus laskee 38,0 kWh/m<sup>2</sup>:sta 20,5 kWh/m<sup>2</sup>:een (ero -17,5) ja lämmitysenergian kulutus kasvaa 81,7 kWh/m<sup>2</sup>:sta 88,9 kWh/m<sup>2</sup>:een (ero +7,2). Energiakustannusero tapausten 1 ja 3 välillä on 1,5 mk/m<sup>2</sup> (lattiapinta-ala). Ikkunapinta-alaa kohden laskettuna energiakustannusero on **5,2 mk/m<sup>2</sup>**. Energiakustannusten nykyarvoksi saadaan 15 vuoden laskenta-ajalla 0 % reaalikorolla 78 mk/m<sup>2</sup>. Maksimi jäädytystehon tarve on tapauksessa 1 117,4 kW (75 W/lattia-m<sup>2</sup>) ja tapauksessa 3 80,1 kW (52 W/lattia-m<sup>2</sup>). Ero tapausten 1 ja 3 välillä on 37,3 kW (81 W/ikkuna-m<sup>2</sup>). Kun oletetaan keskitetyn jäädytyksen marginaaliseksi tehon hinnaksi 1300 mk/kW, ero tapausten 1 ja 3 jäädytysjärjestelmän investointikustannuksissa on **105 mk/ikkuna-m<sup>2</sup>**. Huonekohtaisen jäädytyksen investointikustannukset ovat huomattavasti korkeammat. Investoinnin rajakustannuksella 6500 mk/kW ero jäädytysinvestoinnissa tapausten välillä on **527 mk/ikkuna-m<sup>2</sup>**. Myös tapausten 2 ja 4 vertailu antaa vastaavan tuloksen; ero investointikustannuksissa on hieman pienempi, koska rakennuksen valaistuskuormien taso on alhaisempi kuin tapauksissa 1 ja 3. **Jäädytyksen investointikustannusten pieneneminen onkin tekijä, jolla voidaan perustella sähkökromaattisen lasin käyttöä Suomen olosuhteissa.** Laskelmat osoittavat, että jäädytyksen investointikustannuseron osuus on 60 - 90 % investointikustannuseron ja energiakustannuseron nykyarvon summasta.



Kuva 18. Toimistorakennuksen energiankulutus. Valaistus klo 8-16 vakio 145 W tai päivänvalon valaistusvoimakkuuden mukaan säädettävä. Ikkunan läpäisy säädettävä.

Case 1. Ikkunan ominaisuudet vakiot, valaistus klo 8-16 (145 W/toimistohuone)

Case 2. Ikkunan ominaisuudet vakiot, valaistusta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella) klo 8-16, asetusrarvo 500 lx (max. 145 W/toimistohuone)

Case 3. Ikkunan läpäisyuhdetta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella, asetusrarvo 500 lx), valaistus klo 8-16 (145 W/toimistohuone).

Case 4. Ikkunan läpäisyuhdetta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella, asetusrarvo 500 lx), valaistusta säädetään päivänvalon valaistusvoimakkuuden perusteella (huoneen keskipisteen valaistusvoimakkuuden perusteella) klo 8-16, asetusrarvo 500 lx (max. 145 W/toimistohuone).

### 3.6 SÄHKÖLÄMMITTEINEN IKKUNA

**Sähkölämmitteinen ikkuna** koostuu eristyslaselementistä, jonka sisimmäinen (lähimpänä huonetilaa) lasi on pinnoitettu sähköä johtavalla pinnoitteella, esimerkiksi metallioksidista valmistetulla selektiivipinnoitteella. Kun tähän johdetaan sähkövirta, lasi lämpenee. Sähkölämmitteinen lasi toimii lämpötekniisesti kuten selektiivilasi. Sähkölämmitteinen ikkuna vastaa lämmöneristävyydeltään rakenteeltaan samanlaista selektiivilasi-ikkunaa (mikäli lasien emissiviteetit ovat samat).

Kun sähkövirta johdetaan lasiin, ikkunan lämpöhäviö kasvaa samanlaiseen lämmittämättömään ikkunaan verrattuna, jos muut olosuhteet pysyvät muuttumattomina. Mikäli sähkölämmitteistä kolmilasista ikkunaa, jossa on yksi selektiivipinnoitettu lasi, verrataan kolmilasiseen kirkkaaseen ikkunaan, lämpöhäviö ikkunasta ulos on pienempi sähkölämmitteisessä ikkunassa (mikäli lasin pintalämpötilaa ei kasvateta liian suureksi). Tällöin sähkölämmitteinen ikkuna on lämpöteknisesti parempi kuin vertailutapaus.

Sähkölämmitteisen ikkunan valintaperusteet ovat usein järjestelmätekniisiä. Sähkölämmitteistä lasia käytettäessä voidaan ikkunan pintalämpötila säätää viihtyisäksi, jolloin ikkunan alta voidaan jättää lämmityspatteri pois. Huonelämpötilaa voidaan mahdollisesti myös laskea hieman, koska ikkunan kylmäsiiteily ei alenna huonetilan operatiivista lämpötilaa. Sähkölämmitteistä lasia voidaan käyttää myös estämään huoneilman kosteuden tiivistyminen ikkunan sisäpintaan kosteissa tiloissa, esimerkiksi pesuhuoneissa ja kylpylöissä.

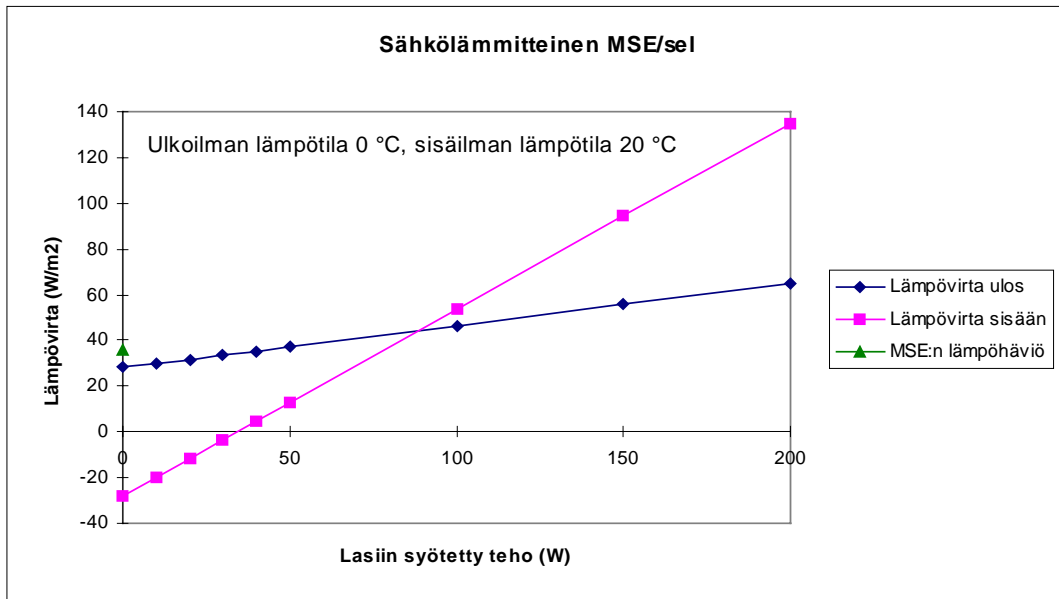
Sähkölämmitteistä ikkunaa voidaan käyttää muiden lämmitysjärjestelmien kanssa, jolloin sähkölämmitteisellä lasilla on viihtyisyyttä parantava funktio. Sähkölämmitteiseen lasiin voidaan myös kytkeä murtohälytys / 8/.

Vertailuesimerkinä esitetään seuraavien tapauksien lämpöhäviö ulos eri toimintatilanteissa:

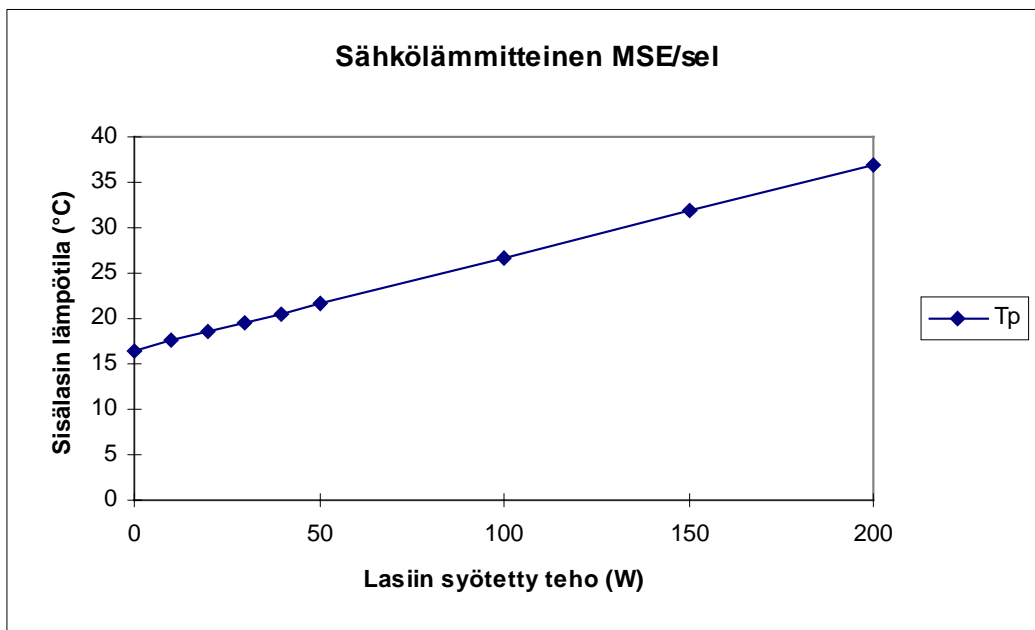
1. kolme kirkasta lasia, 15 mm lasivälit (MSE)
2. yksi selektiivipinnoitettu lasi (emissiviteetti 0,16), kaksi kirkasta lasia (MSE/sel), 15 mm lasivälit
3. sähkölämmitteinen lasi (MSE/sel/L). Sähkölämmitteinen ikkuna vastaa rakenteeltaan tapauksia MSE/sel.

Ulkolämpötilassa 0 °C, sisälämpötilassa 20 °C tapauksen 1 MSE-ikkunan U-arvo on 1,80 W/m<sup>2</sup>K ja lämpöhäviö ulos 36 W/m<sup>2</sup>. Vastaavissa olosuhteissa tapauksen MSE/sel U-arvo on 1,40 ja lämpövirta ulos 28 W/m<sup>2</sup>. Sähkölämmitteisen lasin lämpöhäviö ulos riippuu lasin pintalämpötilasta (mikä taas riippuu lämmitystehosta). Kuvassa 19 on esitetty sähkölämmitteisen lasin lämpöhäviö ulos em. olosuhteissa, kun lämmitysteho muuttuu. Laskelmissa on sisäpuolisena lämmönsiirtokertoimenä käytetty arvoa 8 W/m<sup>2</sup>K. Huonetilan pintojen lämpötila on 20 °C. Kuvassa 20 on esitetty sisimmän lasin lämpötila tehon funktiona.

Sähkölämmitteisen ikkunan lämpöhäviö ulos ikkunasta kasvaa sisintä lasia lämmitettäessä. Jos lasin pintalämpötila nostetaan huonelämpötilaa vastaavaksi, esimerkkitapauksessa lämpöhäviö ulos kasvaa lämmittämättömään tapaukseen verrattuna 22 %.



Kuva 19. Sähkölämmitteisen MSE/sel -ikkunan lämpövirrat ulos ja sisään sisimpään lasiin syötetyn tehon funktiona. Ulkolämpötila  $0^{\circ}\text{C}$ , sisälämpötila  $20^{\circ}\text{C}$ , sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin  $8\text{ W/m}^2\text{K}$ . Ilman lasiin syötettyä tehoa  $U$ -arvo on  $1,4\text{ W/m}^2\text{K}$ .



Kuva 20. Sähkölämmitteisen MSE/sel -ikkunan sisimmän lasin lämpötila lasiin syötetyn tehon funktiona. Ulkolämpötila  $0^{\circ}\text{C}$ , sisälämpötila  $20^{\circ}\text{C}$ , sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin  $8\text{ W/m}^2\text{K}$ . Ilman lasiin syötettyä tehoa  $U$ -arvo on  $1,4\text{ W/m}^2\text{K}$ .

Edellä esitetyt esimerkit ovat sähkölämmitteisen lasin perustapauksia. Sähkölämmitteisen ikkunan **tehokkuutta voidaan parantaa lasiosaa optimoimalla**. Lämpövastus lämmitettävän lasin ja ulkoilman välillä tulee maksimoida ja lämpövastus lasin huoneilman välillä vastaavasti minimoida. Lämpövastusta kasvatetaan selektiivisillä pinnoitteilla, täytekaasuilla ja lasivälit

optimoimalla. Lämpövastus sisäilmaan nähden taas pienenee lasin lämpötilan kasvaessa. Konvektiolämmönsiirtokerroin lasin pinnalla kasvaa lämpötilaeron kasvaessa ja säteilylämmönsiirtokerroin kasvaa lämpötilatason noustessa.

### 3.7 IKKUNAN JA ILMANVAIHDON INTEGROINTI

Ikkuna voidaan integroida osaksi koneellisen poistoilmanvaihdon järjestelmää, jolloin raitisilma johdetaan huonetilaan ikkunan karmin ja puitteen välisestä raosta, josta osa tiivistettä on poistettu, tai ikkunan karmi- tai puiteosaan on liitetty erillinen raitisilmaventtiili. Ikkunan lasivälin kautta voidaan tuoda raitisilmaa huonetilaan, jolloin puhutaan tuloilmaikkunasta. Kylmää ulkoilmaa esilämmitetään tällöin ikkunan lämpöhäviöiden avulla. Poistoilmaikkunan tapauksessa rakennuksen ilmanvaihdon poistoilma imetään ikkunan lasivälin kautta ja poistoilman energiaa hyödynnetään ikkunan pintojen lämmittämiseen.

#### 3.7.1 Raitisilmaventtiili ikkunan karmi- tai puiteosassa

Ikkunaan integroitujen raitisilmaventtiilien toimivuuden selvittäminen oli tutkimuksen yhtenä osatehtävänä. Kolmelle ikkunan karmi- ja puiteosaan asennettavalle tuloilmaventtiilille tehtiin mittaukset, joissa selvitettiin, millainen ilmavirta voidaan tuoda tilaan vedottomasti.

Kolme ikkunaan asennettavaa tuloilmaventtiiliä mitattiin karsitun venttiilien tyyppihyväksyntämittausmenetelmän mukaan. Mittausten tavoitteena on selvittää millä ilmavirroilla vedottomuus-kriteerit täyttyvät. Mittaussuunnitelma perustui ympäristöministeriön tyyppihyväksyntätestin viihtyisyystarkasteluihin:

- jos venttiili ei ole säädettävä, mitataan joillakin paine-eroilla
- jos venttiili on säädettävä, mitataan valitulla paine-erolla säätäen venttiiliä.

Ajatuksena oli aluksi ottaa lähtökohdaksi patteriton tapaus, koska ikkunan U-arvo on hyvä. Patteri tarvitaan kuitenkin tuloilmavirran lämmittämiseen, mikäli testit tehdään ulkolämpötilassa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Venttiilissä 1 oli bi-metallilla säätävä rako. Raon leveys riippuu ilmavirran lämpötilasta. Venttiilissä 2 raon leveys oli manuaalisesti säädettävissä. Venttiilille 2 on tehty vedottomuusmittaukset suodattimen kanssa sekä ilman. **Venttiili ei alustavien mittausten mukaan toteuttanut testeissä ympäristöministeriön vetokriteerejä makuu- ja toimistohuoneille.** Vetokäyrät 3,8 - 4,3 saavutettiin mittauksissa.

Venttiili 1, jossa oli bi-metallilla varustettu säätävä rako, saavutettiin vetokäyrät 3,7 - 4,5.

Venttiiliä 2 kehitettiin edelleen (venttiili 3). Manuaalisesti säädettävän raon tuloilmaventtiiliin tehtiin joitakin muutoksia: Ulkosäleikkö muutettiin vähemmän virtausvastusta aiheuttavaksi. Laitteen sivulla oli tuloilmareiat ohjauslevyjen suunnatessa ilmavirtaa sivuille. Laitteen päällä olevaa tuloilmaraon lähtökulmaa

loivennettiin noin 45°:een. Venttiilin pohjarako teipattiin umpeen ja tuloilmaraon päälle, keskelle, asetettiin 110 mm teippi virtauksen hajottamiseksi. Näiden toimenpiteiden seurauksena saavutettiin ilmavirralla 5,2 l/s vetokäyrä 2,3.

Mittaukset osoittivat, että tuotekehitystarpeita ikkunan tuloilmaventtiileille on. Tuotekehityksessä sovellettavia periaatteita, jotka johtavat hyväksyttävään laitteeseen, ovat suihkun ohjaus kattoon ja suihkun hajottaminen.

### **3.7.2 Tuloilmaikkuna**

Tuloilmaikkunoiden ideana on huoneiden korvausilman sisäänotto ikkunoiden kautta siten, että sisään tuleva ilma lämpenee ikkunan lämpöhäviöiden vaikutuksesta. Ikkunan tehollinen U-arvo pienenee, kun läpi menevää ilmamäärää kasvatetaan. Ilmamäärää ei kuitenkaan voida kasvattaa rajattomasti, sillä ilmamäärän kasvaessa sisäpinnan lämpötila laskee, mistä aiheutuu viihtyisyyden heikkenemistä ja sisäilman vesihöyryn tiivistymisriskin kasvua. Käytännössä kolmilasisella ikkunalla on päästävässä kohtuullisilla ilmamäärillä U-arvoihin, jotka ovat luokkaa 1 W/m<sup>2</sup>.

Tuloilmaikkunan etuna on energian säästön lisäksi toimiminen korvausilman tuloreittinä, jolloin erillisiä raitisilmaventtiileitä ei tarvita. Haittana on sisäpinnan jäähtymisestä aiheutuva kondenssiriski ja viihtyisyyden lasku sekä tuulista aiheutuvat ilman virtaussuunnan muutokset ja näistä aiheutuva kondenssi ikkunan sisään. Haittana on myös ilmanvaihdon pysäyttämistä aiheutuva ikkunoiden kondensoituminen ja ilman virtausaukkojen aiheuttama ääneneneristävyyden heikkeneminen. Ikkunan läpi kulkevan ilman virtausmäärät ovat vaikeasti hallittavissa, sillä tuuli voi aiheuttaa normaaliin ilmanvaihtoon verrattuna moninkertaista paine-eroa ikkunan sisä- ja ulkotilan välille ja siten suuria vaihteluja läpi menevään ilmamäärään.

### **3.7.3 Poistoilmaikkuna**

Poistoilmaikkunassa rakennuksen ilmanvaihdon poistoilma imetään ikkunan sisälasin takana olevasta ilmatilasta. Sisäpuiteen ja karmin välissä on ikkunan alaosassa rako, jonka kautta poistoilma pääsee ikkunan lasien väliseen tilaan. Tässä ikkunatyypissä jokainen ikkuna liitetään ilmanvaihtojärjestelmään, mistä aiheutuu tavallista suuremmat putkistokustannukset. Poistoilmaikkunassa ikkunan läpi imettävä ilma lämmittää sisälasin ja toiseksi sisimmän lasin lähelle sisäilman lämpötilaa. Käytännössä kolmilasisilla ikkunoilla päästään U-arvoihin, jotka ovat luokkaa 0,7 W/m<sup>2</sup>K.

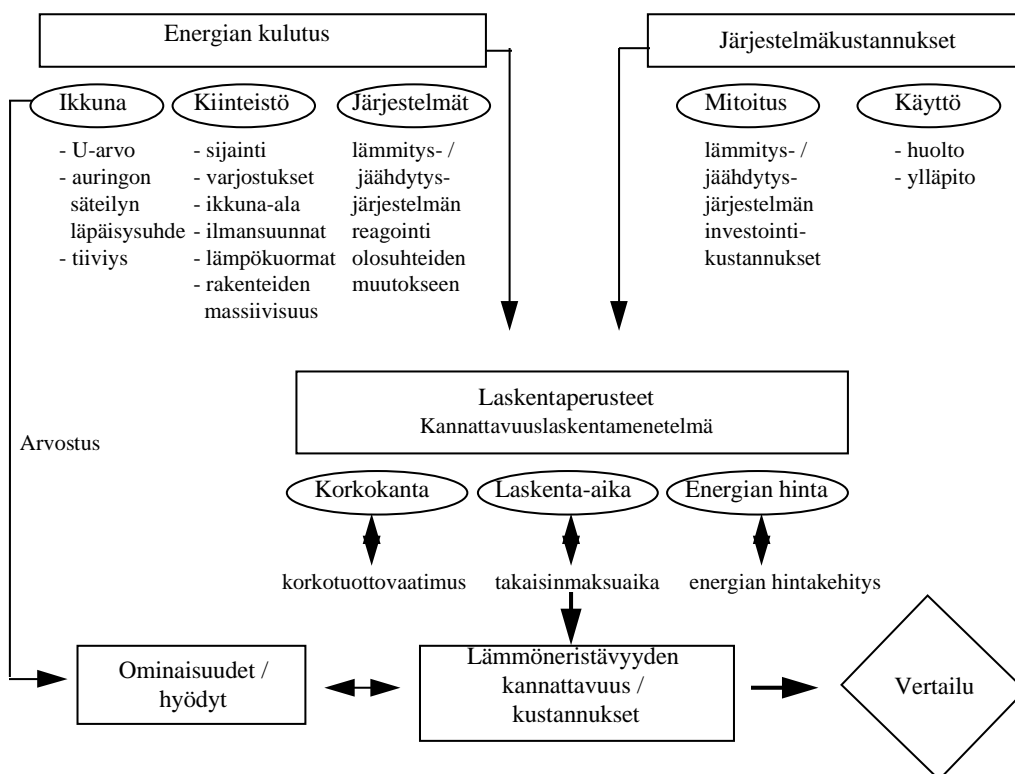
Poistoilmaikkunan etuna on energian säästön lisäksi se, että ikkunan sisäpinnan lämpötila on korkeampi kuin vastaavassa normaalissa ikkunassa. Poistoilmaikkunan haittana on kalliimpi ilmanvaihtoputkitus ja se, että poistoilmaikkunan kautta imetyn poistoilman lämpötila laskee jonkin verran, mikä pienentää mahdollisen lämmöntalteenottolaitoksen hyötysuhdetta. Liian suuri poistoilmamäärä aiheuttaa ilmavirtauksesta johtuvaa vedon tunnetta ikkunan läheisyydessä ja lasien välisessä tilassa olevien sälekaihtimien heilumista ja

kolisemista. Liian pieni poistoilmamäärä tai ilmanvaihtokoneiden pysäyttäminen aiheuttaa sisäilman vesihöyryn tiivistymistä ilmapälin kylmiin pintoihin.

Molemmat ilmavirtausikkunat lisäävät ikkunan lasipintojen likaantumista ja ikkunoiden pesutarvetta. Lisäksi mahdollinen vesihöyryn tiivistyminen ikkunan pintoihin saattaa vaurioittaa pinnoitteita sekä karmi- ja puitemateriaaleja.

## 4 IKKUNAVAIHTOEHTOJEN KANNATTAVUUS

Ikkunoiden taloudellisuusvertailuissa energiankulutus ja järjestelmämitoitus-investoinnit arvioidaan kustannuksina (kuva 21). Parantamalla ikkunan lämmöneristävyyttä riittävästi voidaan kustannussäästöjä saavuttaa yksinkertaistamalla muita lämmöntuottamiseen tai -jakamiseen tarvittavia järjestelmiä. Esimerkiksi lämmityspatterit voidaan jättää pois ikkunoiden alta oleskeluviihtyvyyttä heikentämättä. Lämpöhäviöiden pienentyessä myös tarvittava lämmitysteho pienenee. Ilmanvaihto- ja lattia- tai kattolämmityksessä tehomuutokset vaikuttavat investointikustannuksiin enemmän kuin patterilämmityksessä.



Kuva 21. Ikkunan lämmöneristävyyden parantamisen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät.

Kannattavuuslaskennan laskentaperusteet määrittelevät saavutettavien käyttökustannussäästöjen arvostuksen. Laskentakorkokanta, laskenta-aika, energian hinta ja hintakehitys vaikuttavat hyvin oleellisesti ikkunoiden elinkaarikustannuksiin ja kustannuseroihin. Matalalla laskentakorkokannalla ja pitkällä laskenta-ajalla arvostetaan käyttöaikana syntyviä kustannuksia tai säästöjä. Korkealla laskentakorkokannalla ja lyhyellä laskenta-ajalla tilanne on päinvastoin.

Reaalikorko (laskentakorkokantana käytetään reaalikorkoa) on inflaation verran nimelliskorkoa matalampi. Kansantaloudellisten investointien tarkastelussa on 5 %:n reaalikorko osoittautunut sopivaksi ja riittäväksi koroksi / 12/. Yksi-



tyistaloudellisten investointien korkovaatimus vaihtelee mm. ympäristöarvojen, lainojen reaalikoron ja mahdollisten tukien mukaan.

Ikkunan todellinen käyttöikä vaihtelee tapauksittain, minkä vuoksi laskelmissa käytettävä laskenta-aika on aina arvio. Tarkastelujakson pituuteen vaikuttaa myös se aika, jonka kuluessa investoinnin vaaditaan maksavan itsensä takaisin (sisäinen korko).

Energian yksikköhintana on luontevinta käyttää rajakustannusta. Tällöin siihen sisältyvät vain ne tekijät, jotka syntyvät ja muuttuvat energiaa tuottaessa. Merkittävimmät lämmitysenergiälähteet ovat sähkö, öljy ja kaukolämpö. Näiden lämmönlähteiden kuluttajahinnat vaihtelevat 12 p/kWh (kaukolämpö) - 40 p/kWh (suora sähkölämmitys). Energiatuotannon aiheuttamien ympäristöhaittojen kustannuksia ei nykyään oleellisesti oteta huomioon energianhinnassa. Mikäli nämä haittakustannukset huomioitaisiin, energianhinnat olisivat noin 2 - 20 p/kWh nykyisiä kuluttajahintoja korkeampia. Mikäli energianhinnan otaksutaan nousevan laskenta-aikana, voidaan reaalkorkokannasta suoraan vähentää vuosittainen energian hinnan kasvu.

Kannattavuuslaskentamenetelmänä voidaan käyttää nykyarvomenetelmää, jossa kaikki kustannukset siirretään nykyhetkeen huomioiden ajan ja koron merkitys tai sisäisen koron menetelmää, jossa selvitetään millä korkokannalla eri vaihtoehtojen elinkaarikustannukset ovat samat tai vuosikustannusmenetelmää, jossa elinkaaren kokonaiskustannukset jaetaan vuosikustannuksiksi huomioiden ajan ja koron merkitys. Oleellista on ottaa huomioon kaikki elinkaaren aikana syntyvät merkittävät kustannukset ja niiden eriaikaisuus. Kannattavuuden selvittämiseksi voidaan soveltaa sekä nykyarvomenetelmää että sisäisen koron menetelmää. Takaisinmaksuajan (nykyarvomenetelmä, tietty korkokanta) tai korkotuoton (sisäisen koron menetelmä, tietty laskenta-aika) informaatio täydentävät toisiaan.

Ikkunoiden energiataloudellisen kannattavuuden selvittämiseksi voidaan esimerkiksi tarkastella perusikkunasta parannetun ikkunan kannattavuutta ( $\text{mk/m}^2$ ). Tällöin tiedetään, kuinka paljon enemmän lämmöneristävyydeltään paremmasta ikkunasta on kannattavaa enimmillään maksaa ostohetkellä esitetyillä lähtöoletuksilla. Investointihintaerossa mitattava kannattavuusraja on mm. kuluttajien kannalta havainnollisempi kuin korkotuotto. Esitetyn kannattavuuden perusteella voidaan laskea myös ikkunaratkaisun takaisinmaksuaika perusikkunaan nähden.

Kannattavuus perustuu saavutettaviin säästöihin energiakustannuksissa käyttöaikana ja uudistuotannossa lisäksi rakennusaikana saavutettaviin säästöihin. Energiakustannuksiin vaikuttavat energiankulutus ja energian hinta. Energian hinta koostuu liittymismaksusta, vuosittaisesta perusmaksusta ja lämpöenergian yksikköhinnasta.

## 4.1 IKKUNAN VALINTA ASUINPIENTALLOSSA

Ikkunoiden U-arvon parantamisen kannattavuuteen vaikuttavat auringon kokonaisenergian läpäisyosuuteen muutos, rakennuksen maantieteellinen sijainti (astepäiväluku), lämmitysenergian hinta, lämmitysjärjestelmä, tarkastelu-aika ja laskentakorkokanta.

Lasiosan lämmönläpäisykertoimen parantamisen kannattavuus asuinpientalossa on 15 vuoden tarkasteluajalla, 5 % laskentakorkokannalla ja energian hinnalla 30 p/kWh U-arvoyksikön kymmenystä kohden maantieteellisesti sijainnista riippuen 27 - 30 - 38 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> (Helsinki - Jyväskylä - Sodankylä). Huomioitaessa säästöt lämmitysjärjestelmän investointikustannuksissa mitoitusstehon pienentyessä em. lämmönläpäisykertoimen parantamisen kannattavuus lisääntyy 2 - 6 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> käytettäessä patterilämmitystä (suora sähkö- tai öljylämmitys), 9 - 12 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> käytettäessä ilmanvaihtolämmitystä ( + vesikiertoinen lattialämmitys) ja 14 - 17 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> käytettäessä vesikiertoista lattialämmitystä. / 15/

Perinteisen kirkaslasisen MSE-ikkunan (U-arvo 1,8 W/m<sup>2</sup>K) lämmöneristävyuden parantaminen tasolle 1,1 - 1,4 W/m<sup>2</sup>K on nykyisillä rakennusmateriaalihinnoilla kannattavaa. Mikäli ikkunavalinnalla voidaan saavuttaa esitetyt säästöt myös lämmitysjärjestelmän investointikustannuksissa on ikkunan parantaminen kannattavaa tasolle 0,9 W/m<sup>2</sup>K, mikäli lämmitysjärjestelmänä on ilmanvaihtolämmitys tai vesikiertoinen lattialämmitys. Myös asuinkerrostalossa nykyistä parempien ikkunoiden käyttö on perusteltua. / 15/

Selektiivilasilla varustetun MSE-ikkunan (U-arvo on 1,35 W/m<sup>2</sup>K) ikkunan takaisinmaksuaika tavalliseen MSE-ikkunaan (U-arvo on 1,8 W/m<sup>2</sup>K) nähden on energian hinnalla 30 p/kWh 4 - 7 vuotta (Helsinki, 5 %), taulukko 7. Mikäli säästöt lämmitysjärjestelmässä otetaan huomioon on takaisinmaksuaika 0 - 7 vuotta, taulukko 8. MSE-1,15 ikkunan takaisinmaksuaika on 6 - 10 vuotta. Mikäli säästöt lämmitysjärjestelmässä otetaan huomioon, on takaisinmaksuaika 0 - 7 vuotta. Ikkunan parantamisen tasolle 0,9 W/m<sup>2</sup>K takaisinmaksuaika on 14 - 27 vuotta. Mikäli säästöt lämmitysjärjestelmässä otetaan huomioon, takaisinmaksuaika on 8 - 25 vuotta. / 15/

*Taulukko 7. Ikkunavaihtoehtojen takaisinmaksuaikoja MSE-1,8 -ikkunaan verrattuna eri paikkakunnilla asuinpientalossa. Energian hinta 30 - 50 p/kWh, 5 %. Lämmitysjärjestelmäninvestointia ei ole huomioitu.*

Ikkunavaihtoehto	Helsinki, v	Jyväskylä, v	Sodankylä, v
MSE-1,35	4 - 7	4 - 6	3 - 5
MSE-1,15	6 - 10	5 - 8	4 - 6
MSE-0,9	13 - 27	10 - 25	8 - 14

Taulukko 8. Ikkunavaihtoehtojen takaisinmaksuaikoja MSE-1,8 -ikkunaan verrattuna eri paikkakunnilla asuinpientalossa, kun otetaan huomioon lämmitysjärjestelmäinvestointi. Energian hinta 30 - 50 p/kWh, 5 %.

Ikkunavaihtoehto	Helsinki, v	Jyväskylä, v	Sodankylä, v
MSE-1,35	0 - 7	0 - 4	0 - 4
MSE-1,15	0 - 7	0 - 6	0 - 5
MSE-0,9	8 - 25	8 - 17	6 - 13

Perusikkunaa (U-arvo on 1,8 W/m<sup>2</sup>K) parempien ratkaisuiden kannattavuus lisääntyy ja takaisinmaksuaika lyhenee hieman siirryttäessä pohjoisemmille paikkakunnille. Mikäli laskentakorkokanta poikkeaa 5 %:sta, muuttuvat takaisinmaksuajat. Mikäli takaisinmaksuaika on enimmillään 10 vuotta (5 %) ei korkokannan muutos vaikuta kovin paljon. Esimerkiksi 10 vuoden takaisinmaksuaika (5 %) on 13 vuotta korkokannalla 8 % ja 7 vuotta korkokannalla 0 %. Yli 10 vuoden takaisinmaksuajoilla korkokannan valinnalla on suurempi merkitys. / 15/

## 4.2 IKKUNAN VALINTA TOIMISTORAKENNUKSESSA

Ikkunoiden U-arvon parantamisen kannattavuuteen vaikuttavat samanaikaisesti tehtävä lasiosan auringon kokonaisenergian läpäisy-suhteen muutos, rakennuksen maantieteellinen sijainti (mm. astepäiväluku), ikkunoiden ilmansuunta ja pinta-ala, energian hinta, jäähdytysjärjestelmä, sisäiset lämpökuormat, tarkastelu-aika ja laskentakorkokanta.

MSE-ikkunan lasiosan lämmönläpäisykertoimen parantamisen kannattavuus on (15 a, 5 %) tilakohtaisella jäähdytyksellä (tehokustannus 1300 mk/kW / 13/) U-arvoyksikön kymmenystä kohden maantieteellisesti sijainnista riippuen itä- ja länsijulkisivulla 18 - 21 - 26 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> (Helsinki - Jyväskylä - Sodankylä). Pohjoiseen suunnatun ikkunan kannattavuus on noin 10 % edellistä enemmän ja etelään suunnatun 10 - 20 % vähemmän. Käytettäessä huonekohtaista jäähdytystä (tehokustannus 6500 mk/kW / 13/) U-arvon parantamisen kannattavuus heikkenee itään, etelään tai länteen suunnatuilla ikkunoilla keskimäärin 10 - 20 % ja pohjoiseen suunnatulla ikkunalla noin 5 %. / 15/

Säteilynläpäisyn rajoittamisen kannattavuus kun käytetään tilakohtaista jäähdytysjärjestelmää on yksikön kymmenystä kohden maantieteellisesti sijainnista riippuen itä- ja länsijulkisivulla keskimäärin 68 - 62 - 51 mk/ikkuna-m<sup>2</sup> (Helsinki - Jyväskylä - Sodankylä). Pohjoiseen suunnatun ikkunan kannattavuus on noin 70 % edellistä vähemmän ja etelään suunnatun noin 25 % enemmän. Käytettäessä huonekohtaista jäähdytystä säteilynläpäisyn rajoittamisen kannattavuus tulee noin 2 - 3 kertaiseksi. / 15/

Perinteisen kirkaslasisen MSE-ikkunan (U-arvo 1,8 W/m<sup>2</sup>K) lämmöneristävyuden parantaminen tasolle 1,1-1,4 W/m<sup>2</sup>K on nykyisillä rakennusmateriaalihinnoilla

kannattavaa. Tällöin myös ikkunan säteilynläpäisy pienenee hieman (erillinen auringonsuojalasi tai muu auringonsuojaus tarvittaneen kuitenkin etelä- ja länsijulkisivulle). Ikkunan parantaminen tasolle  $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja samanaikaisesti läpäisy-suhteen rajoittaminen esimerkiksi tasolle  $0,4$  on kannattavaa etelä- ja länsijulkisivulla ja myös muilla julkisivuilla mikäli käytetään tehokustannuksiltaan kallista jäähdytysjärjestelmää (huonekohtainen järjestelmä). / 15/

Ikkunan lämmöneristävyuden parantamisen tasolta  $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  tasolle  $1,35 \text{ W/m}^2\text{K}$  takaisinmaksuaika (5 %) on tilakohtaisella jäähdytyksellä ikkunan suuntauksesta riippuen 8 - 10 vuotta (Helsinki), 7 - 8 vuotta (Jyväskylä) ja 6 - 7 vuotta (Sodankylä). Käytettäessä huonekohtaista jäähdytystä takaisinmaksuajat pienenevät 2 - 5 vuotta. Ikkunan parantamisen tasolle  $1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  takaisinmaksuaika on suuntauksesta riippuen 10 - 12 vuotta (Helsinki), 8 - 10 vuotta (Jyväskylä) ja 6 - 8 vuotta (Sodankylä). Käytettäessä huonekohtaista jäähdytystä takaisinmaksuajat pienenevät enimmillään 5 vuotta. / 15/

Mikäli laskentakorkokanta poikkeaa 5 %:sta muuttuvat takaisinmaksuajat. Mikäli takaisinmaksuaika on enimmillään 10 vuotta (5 %), ei korkokannan muutos vaikuta kovin paljon. Esimerkiksi 10 vuoden takaisinmaksuaika (5 %) on 13 vuotta korkokannalla 8 % ja 7 vuotta korkokannalla 0 %. Yli 10 vuoden takaisinmaksuajoilla korkokannan valinnalla on suurempi merkitys.

Ikkunan U-arvon parantaminen ja kokonaisenergian läpäisyn rajoittaminen vähentävät aina jäähdytetyn toimistorakennuksen energiakustannuksia. Tosin U-arvon parantaminen ei ole yhtä kannattavaa kuin asuinpientalossa ja asuinrakennuksissa yleensä. Toimistorakennuksissa käytettävien ikkunoiden tuotekehityksessä olisi kiinnitettävä huomiota yhtäaikaiseen U-arvon parantamiseen ja säteilynläpäisyn rajoittamiseen. Alimman sallitun kokonaissäteilyn läpäisyn (näkyvän valon läpäisyn) määrittävät mm. haluttu sisääntuleva päivänvalon määrä ja julkisivun arkkitehtuuri.

## 5 IKKUNOIDEN EKOLOGISUUS

Ikkunan valmistuksessa energiaa kuluu puite- ja karmiprofiilien valmistukseen, pintakäsittelyyn ja lasikomponenttien sekä helojen valmistukseen. Ikkunalasin valmistus sitoo energiaa 4,56 kWh/kg / 14/. Suomessa yleisesti käytetyn 3 mm:n paksuisen tasolasin valmistuksessa kuluu energiaa 34 kWh/m<sup>2</sup>. Eristyslasin valmistuksessa energiaa kuluu tiivistemassojen, kuivikeaineen ja välilistan valmistukseen. Puurakenteisen ikkunan (3-lasinen MSE-ikkuna) valmistuksen energiasisältö on 170 - 180 kWh/m<sup>2</sup>. Tämä jakautuu siten, että karmi- ja puitemateriaalin ja pintakäsittelyaineiden sekä helojen osuus on 20 %, lasien 45 % ja valmistuksen 35 %.

Ikkunoiden käytönaikaisiin ympäristövaikutuksiin vaikuttaa eniten ikkunan lämmöneristävyys. Puurakenteiden MSE-ikkunan kuluttamasta energiasta valmistuksen osuus on 2,9 %, kunnossapidon 0,8 % ja lämmityksen 96,3 % 50 vuoden elinkaaren aikaisesta energiankulutuksesta / 11/. Vastaavat luvut puurakenteisella MSE-selektiivilasi-ikkunalla ovat 3,8 %, 1,1 % ja 95,1 %. Parantamalla ikkunan lämmöneristävyttä voidaan tehokkaimmin vaikuttaa ikkunoiden elinkaaren aikana sitoutuneeseen kokonaisenergiamäärään ja ympäristön kuormitukseen. Esimerkiksi korjausrakentamisessa ei ole oleellista, miten perusparannettava vanha ikkuna saatetaan lämmöneristävyydeltään jollekin tasolle / 16/ - oleellista on, miten saavutetaan taloudellisesti paras U-arvo ja hyvä pitkäaikaiskestävyys.

### 5.1 IKKUNAN KARMI- JA PUITEMATERIAALI

Ympäristövaikutusten muodostuminen ei ole aina suoraan verrannollinen ikkunan energiasisältöön. Taulukossa 9 on esitetty puu ja puu-alumiini-ikkunan valmistuksen ja kunnossapidon ympäristövaikutukset 50 vuoden tarkastelujaksolla. Puu-alumiini-ikkunan valmistuksen ja kunnossapidon energiasisältö on 10 % puuikkunaa pienempi. Sen sijaan ympäristövaikutukset ovat ilmaston lämpenemisen osalta 25 %, happamoitumisen osalta 7 % ja kriittisen ilmamäärän osalta 5 % suuremmat kuin puuikkunalla. Otsonin muodostumisen ja rehevöitymisen osalta puuikkunan ympäristövaikutukset muodostuivat noin 20 % suuremmiksi. Edellä olevat erot johtuvat pääosin alumiinikomponenttien ja pintakäsittelyn erilaisista määristä vertailtavissa ikkunoissa. Laskelmissa ei ole huomioitu lasin energiasisältöä kierrätyksessä eikä puukomponenttien polttoarvoa. Laskelmissa alumiinin kierrätysasteena käytetään 70 %.

Puuikkunan aiheuttamia ympäristökuormituksia voi pienentää mm. kehittämällä pintakäsittelyaineita ja työmenetelmiä, jolloin puuikkunan huoltotarve pienenee. Pintakäsittelytarpeen pieneminen vaikuttaa suoraan rehevöitymis- ja otsoninmuodostuspotentiaaleihin. Puu-alumiini-ikkunan ekologisuuden parantamisen merkittävin tekijä on alumiinin kierrätysasteen nostaminen tai alumiinin määrän vähentäminen. Alumiinin valmistuksen merkittävimmät ympäristövaikutukset ovat ilmaston lämpeneminen, happamoituminen ja korvausilman tarve päästöjen saattamiseksi sallitulle tasolle.

Taulukko 9. Puu- sekä puu-alumiini- rakenteisen MSE-ikkunan valmistukseen ja kunnossapitoon käytetty energia sekä aiheutuvat ympäristövaikutukset / 11/.

GWP = Global Warming Potential, ilmaston lämpenemispotentiaali (grammaa hiilidioksidia)

AP = Acidification Potential, happamoitumispotentiaali (grammaa rikkidioksidia)

NP = Nitrification potential, rehevöitymispotentiaali (grammaa fosfaatteja)

POCP = Photochemical Ozone Creation Potential, fotokemiallinen oksidanttien muodostuspotentiaali (grammaa eteeniä)

CAV = Critical Air Volume, kriittinen ilmatilavuus sallituun pitoisuuteen pääsemiseksi (kuutiometrejä korvausilmaa)

Ikkuna 12Mx12M	Puu			Puu-alumiini		
	Valmistus	Kunnossapito	Yht.	Valmistus	Kunnossapito	Yht.
Käytetty energia, kWh	280	85	365	304	26	330
Ympäristövaikutukset						
GWP, g(CO <sub>2</sub> )	39 800	2 500	42 300	52 000	750	53 000
AP, g(SO <sub>2</sub> )	150	5	154	163	2	165
NP, g(PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	10	0,6	11	9	0,2	9
POCP, g(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0,7	0,01	0,7	0,6	0,003	0,6
Vaarallisuus terveydelle, CAV	464 000	17 000	481 000	498 000	5 200	503 000

## 5.2 IKKUNAN LASIOSA

Energiateknisesti on taloudellisempaa parantaa ikkunan lämmöneristävyyttä käyttämällä lisälasin asemasta selektiivilaseja (tai pinnoitettu kalvo). Selektiivilasi säästää pienentyneenä lämmitystarpeena valmistusenergiansa 1 - 2 kuukaudessa (Taulukko 10). Myös muut ikkunan lämmöneristävyyttä parantavat toimenpiteet säästävät nopeasti valmistukseen käytetyn energiamäärän. Selektiivilasin valmistuksen energiasisällöstä ei ole saatavilla aivan tarkkoja lukuja. Arviolta selektiivipinnoitusprosessin energiatarve on luokkaa 5 kWh/m<sup>2</sup>. Lasin sijasta käytettävän kalvon valmistukseen ja pinnoittamiseen kuluu valmistajan tiedon mukaan energiaa 1,5 - 2,5 kWh/m<sup>2</sup>.

Jalokaasujen valmistus nesteytetystä ilmasta erottamalla vaatii runsaasti energiaa. Ilmakehässä on argonia 0,94 % ja kryptonin 0,0001 %. Jalokaasujen valmistukseen sitoutuvasta energiamäärästä ei toistaiseksi ole saatavilla tarkkoja lukuja. Valmistusprosessin energiatarve on erään valmistajan mukaan argonilla, kun huomioidaan erotteluprosessi (mooliosuudet, aineen muodostumisnopeus ym.) ja koko prosessin energiakulutuksen jakauma (hyödynnettävät ja ei-hyödylliset lopputuotteet) luokkaa 0,25 - 0,5 kWh/m<sup>3</sup> (Messer Griesheim). Kryptonin ja xenonin energiasisältö on arviolta 20 - 30 kWh/m<sup>3</sup> ja 200 - 300 kWh/m<sup>3</sup>.

*Taulukko 10. Erityyppisten MSE-ikkunoiden lasiosan valmistuksen energiasisältö, lämmitysenergian kulutus (50 vuotta), nettosäästö ja energiataseen takaisinmaksuaika (kk). MSE, 2 sel-ikkunassa on sisäpuutteessa kolminlasinen eristyslasi, jossa on kaksi selektiivilasia. Koko ikkunan U-arvo arvioitu 12Mx12M kokoiselle ikkunalle.*

	MSE	MSE, sel	MSE+kalvo	MSE, 2 sel
U-arvo, W/m <sup>2</sup> K	1,75	1,35	1,1	1,0
Valmistusenergia, kWh/m <sup>2</sup>	115	120	120	156
Lämmitysenergia, kWh/m <sup>2</sup>	9188	7088	5785	5260
Yhteensä, kWh/m <sup>2</sup>	9303	7208	5905	5416
Nettosäästö, kWh/m <sup>2</sup>	-	2095	3398	3887
Valmistuksen lisäenergian takaisinmaksuaika, kk	-	1,5	0,9	6,3

### 5.3 IKKUNAN PURKU JA KIERRÄTYS

Ikkunan käyttöikä on yleensä 30 - 50 vuotta. Ikkunan valmistusaineiden kierrätys on nykyään harvinaista ja usein rakennuksista poistetut vanhat ikkunat ovat päätyneet kaatopaikalle. Ikkunan helpoimmin kierrätettävät osat ovat lasi ja alumiini. Muiden osien ja materiaalien kierrättäminen vaatii runsaasti käsityötä tai purku- ja kierrätysmenetelmien kehittämistä.

Lasiosa voidaan usein purkaa ikkunasta ehjinä, jolloin se voidaan käyttää uudelleen tai muuhun sopivaan tarkoitukseen. Rikkoontumisvaaran takia varsinkin eristyslasioiden purkaminen on kuitenkin melko työlästä. Toinen vaihtoehto on rikkoa ikkunan lasit ja kerätä lasimurska talteen kierrätystä tai uusiokäyttöä varten. Ikkunassa oleva lasi voidaan käyttää uusioraaka-aineena lähinnä muiden lasituotteiden, kuten esimerkiksi pullojen tms. valmistuksessa. Ikkunalasille asetetut laatuvaatimukset rajoittavat vanhojen lasien käyttöä uuden ikkunalasin raaka-aineena. Pinnoitettujen lasien käyttö ei oleellisesti vaikuta ikkunan kierrätettävyyteen. Ikkunan lasimassasta voidaan arviolta 80 - 95 % käyttää uudelleen.

Ikkunan alumiiniset komponentit joudutaan purkamaan ikkunasta lähes kokonaan käsityönä. Lasin rikkomisen jälkeen alumiinisiin puitteisiin jääneet lasi- ja tiivistejäänneet sekä muut epäpuhtaudet voidaan erotella alumiinista koneellisesti. Ikkunoiden alumiiniprofiileja ja -komponentteja voidaan harvoin käyttää sellaisenaan uudelleen, joten ne joudutaan sulattamaan sekä profiloimaan ja pintakäsittämään uudelleen. Alumiinin kierrätys on erittäin kannattavaa, sillä sen ominaisuudet eivät muutu kierrätyksessä ja kierrätetyn alumiinin energiasisältö on vain 5 - 7 % neitseellisen alumiinin energiasisällöstä. Ikkunan alumiinikomponenttien kierrätysaste on tulevaisuudessa todennäköisesti jopa 90 - 95 %.

Ikkunoiden maalattujen puukomponenttien kierrätys ja uudelleenkäyttö on osittain rajoitettua. Puukomponentteja voidaan sellaisinaan käyttää uudestaan lähes kokonaan moniin uusiin käyttötarkoituksiin. Ikkunoissa on käytetty kyllästettyjä sekä

liuoteohenteisilla maaleilla pintakäsiteltyjä puukomponentteja, eikä niiden turvallisesta hävittämisestä polttamalla ole tietoa. Puunsuoja-aineilla käsiteltyjä puukomponentteja ei voida polttaa syntyvien arseeni-, kromi- ja booripäästöjen takia. Osa maalatuista puukomponenteista voidaan polttaa muun polttoaineen, esimerkiksi turpeen tai jätepuun mukana.

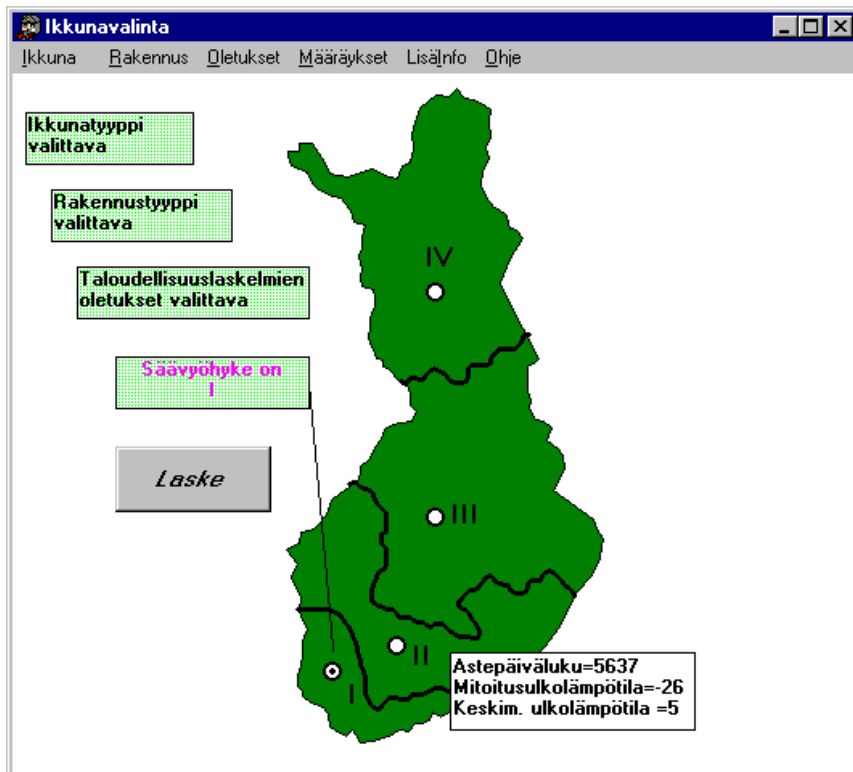


## 6 TALOUDELLISEN IKKUNAVAIHTOEHDON VALINTAOHJELMA

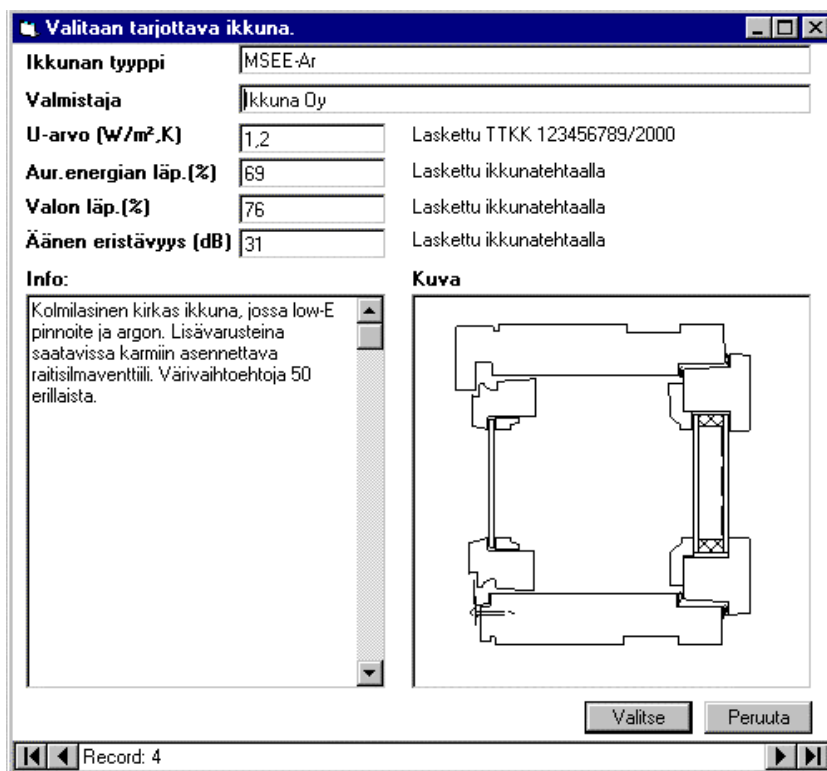
Energiatekniseltä toiminnaltaan parasta nykYTEknologiaa edustavien ikkunavaihtoehtojen myynnin ja käyttöönoton esteenä on usein epätietoisuus valinnan taloudellisesta kannattavuudesta. Hinnaltaan hieman kalliimpi energiatehokas ratkaisu voi olla investointina kannattava jo nykyisillä energian hinnoilla. Hyvän ikkunan valinta voi energiakustannussäästön lisäksi johtaa myös lämmitysjärjestelmän mitoitusinvestoinnin pienenemiseen, mikä on realisoitavissa kustannussäästöksi yleensä vain uudisrakentamiskohteessa. Viihtyisyyden paraneminen synnyttää oman tuottovaikutuksen tyytyväisen käyttäjän tuottavuuden lisääntymisen kautta.

Energiatehokkaiden ikkunavalintojen helpottamiseksi on kehitetty valintatyökalu / 10/, jolla voidaan arvioida taloudellista kannattavuutta (kuva 22). Ikkunavaihtoehtoja voidaan verrata rakentamismääräysten minimimitason mukaiseen tai korjauskohteessa nykyiseen ikkunaan. Menetelmässä vertaillaan siis kahta ikkunavaihtoehtoa keskenään. Energiansäästövaikutus voidaan laskea eri ilmastovyöhykkeille (I - IV) ja muuttaa energiakustannussäästöksi valitulla energian hinnalla, korkokannalla ja laskentajaksolla. Mitoitusinvestointeja voidaan arvioida, kun tiedetään lämmitysjärjestelmän investoinnin rajakustannus.

Ikkunavalintatyökalun energia- ja teholaskenta noudattavat Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 / 4/ laskentaperiaatteita. Ikkunavaihtoehdon energianteknistä toimintaa kuvaavat tuotekohtaiset parametrit (kuva 23), lämmönläpäisykerroin (U-arvo) ja aurinkoenergian läpäisyysuhde. Ominaisuuksien tulee olla määritettyjä hyväksyttävällä tavalla laskennallisesti tai kokeellisesti.



Kuva 22. Ikkunavaihtoehdolla saavutettava energiakustannussäästö riippuu mm. ilmastovyöhykkeestä (I - IV).



Kuva 23. Esimerkki ohjelmalla valittavan ikkunan tuotetiedoista. Ilmoitetun tuotetiedon perässä on viittaus kirjalliseen dokumenttiin, jossa ominaisuudet on luotettavasti selvitetty.

Rakennuksen kuvauslomakkeessa (kuva 24) annetaan laskettavan kohteen perustiedot: rakennustyyppi, rakentamisvuosi, geometriatiedot, ikkunoiden pinta-alat sekä vertailuikkunan (johon tarjottavaa ikkunaa verrataan) tiedot.

**Laskentatapauksen nimi, vapaata tekstiä**

**Rakennustyyppin valitset tästä**

**Uudistuotanto vai saneeraus? Valitse tästä**

**Lämmitysmuodon voit valita tästä**

**Tässä syötät ikkunoiden alat eri suuntauksille**

**Rakennuksen mitat annat tässä**

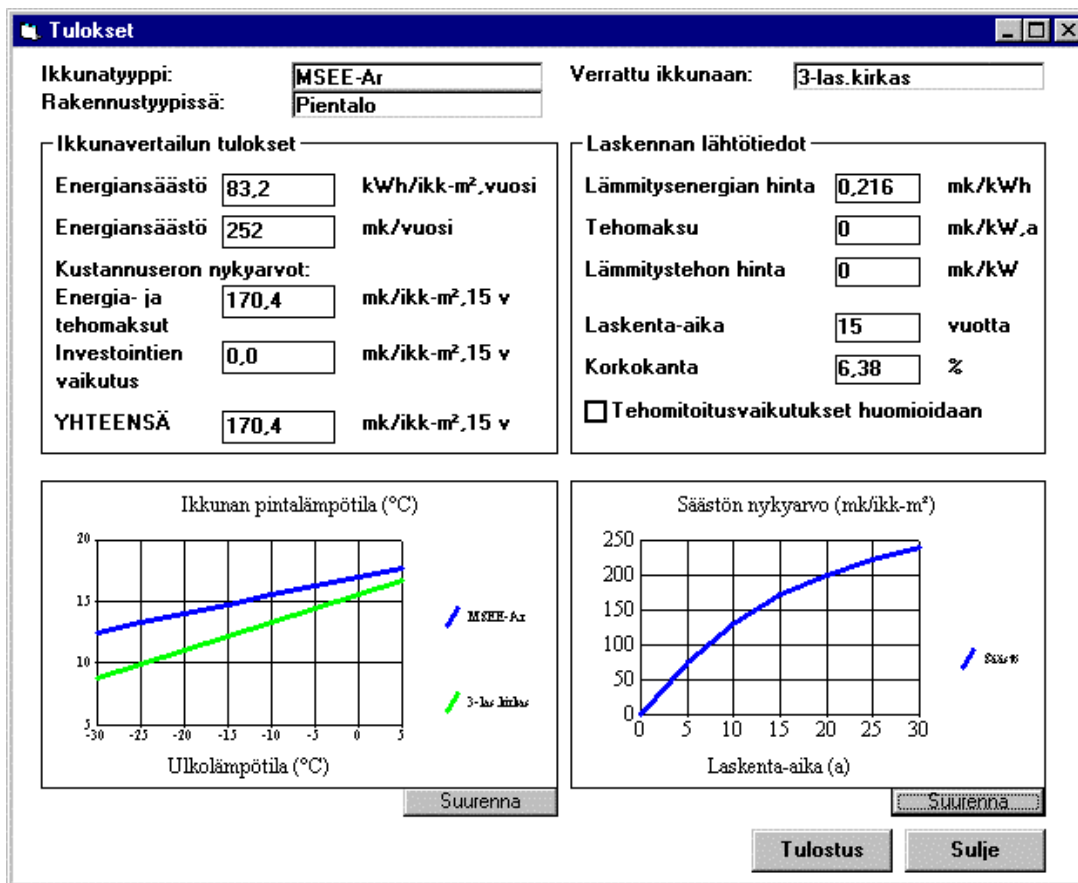
**Tarjottavan ikkunan ominaisuudet näkyvät myös tässä**

**Voit hakea perusikkunan ominaisuudet myös tehtaan omista tiedoista. Oletusarvoisesti rakennuksessa on aina ensin 3-lasinen kirkas ikkuna.**

Kuva 24. Rakennuksen kuvauslomake.

Ohjelma valitsee energian hinnan tarkasteltavan rakennuksen tyyppin ja lämmitysmuodon (kaukolämpö, suora sähkö, varaava sähkö tai öljylämmitys) mukaan. Hintoina käytetään KTM:n Energiakatsauksen 3/97 antamia hintoja. Korkokantana käytetään 5 %:n reaalikorkoa, joka on KTM:n Energiatutkimusohjelman loppuraportissa (KTM Katsauksia B:162/93) / 12/ esitetty energiataloudellisten laskelmien korkokanta. Suotavaa on kuitenkin - mikäli tietoa on - käyttää oikeita rakennuksen energian ja tehon hintoja sekä asiakkaan määrittelemää korkokantaa. Lämmitystehon vuosimaksu ja tehon hankintakustannukset ovat oletusarvoisesti nollia. Tehomaksut tulee valita tapauskohtaisesti.

Paremmalla ikkunalla saavutettavat hyödyt verrattuna perusvaihtoehtoon esitetään tuloslomakkeella (kuva 25). Vuotuinen energiansäästö ikkunapinta-alaa kohti ja koko rakennuksessa sekä energiakustannussäästöjen nykyarvo valitulla energian hinnalla ja korkokannalla esitetään. Tuloslomakkeessa voidaan ottaa huomioon paremmalla ikkunalla saavutettavat lämmitysjärjestelmän mitoitussäästöt, tai ne voidaan jättää pois. Viihtyisyysvaikutusta havainnollistetaan tarjottavan ikkunan ja vertailuikkunan keskimääräisten pintalämpötilojen avulla.



Kuva 25. Paremmalla ikkunavaihtoehdolla saavutettavat hyödyt verrattuna perustapaukseen.

Ohjelma vastaa ostajan kysymykseen: kuinka paljon valittuun ikkunavaihtoon kannattaa (saavutettavissa olevien energiansäästöjen perusteella) investoida enemmän kuin määräysten minimitason mukaiseen ikkunaan. Ikkunan ostaja voi näin vertailla ikkunan lisähintaa saavutettavan energiansäästön nykyarvoon. Ikkunavalmistajalle ohjelma antaa palautetietoa tuotekehitykseen: kuinka paljon tuotteen parantamiseen kannattaa panostaa (kuinka paljon valmistuksen lisähinta saa olla), jos käyttäjä valitsee sen energiakustannussäästön perusteella?

## 7 YHTEENVETO

Suomalaisten MSE-tyyppisten ikkunoiden lämmöneristävyys on hyvä muissa maissa käytettyihin ikkunatyyppeihin verrattuna. Parasta nykYTEknologiaa hyödyntävää lasiosaa (selektiivilasit, täytekaasu) käytettäessä saavutetaan U-arvo  $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ikkunan lämmöneristävyys onkin heikoin karmi- ja puiteosassa, jonka suhteellinen osuus ikkunan pinta-alasta on tyypillisesti noin 25 %. Tämän vuoksi ikkunan lämmöneristävyuden parantaminen kannattaakin aloittaa lasiosasta, jossa se on myös teknisesti helpompaa. Karmi- ja puiteosan parannuskeinot, mm. lämpökatkot ja puun dimensioiden optimointi, ovat hankalia toteuttaa valmistusteknisistä syistä.

Rakennusten jäähdytystarpeen kasvaessa kannattaa aurinkokuormia rajoittaa auringonsuojalaseilla. Auringonsuojalaseja käytetäänkin tyypillisesti toimisto- ja julkisissa rakennuksissa. Lasivalinta tulee sopeuttaa rakennuksen kuormitustasoon. Asuinrakennuksissa ei Suomen olosuhteissa yleensä käytetä jäähdytystä. Hyvin eristetyissä asuinrakennuksissa yllilämpöongelmia saattaa esiintyä kesäkuukausina, joten auringonsuojalaseit voivat tulla kysymykseen myös asuinrakennuksissa.

Lupaavin uuden lasiteknologian innovaatio tällä hetkellä on ns. sähkökromaattinen lasi. Materiaali on vielä laboratorioasteella ja käytännön rakennussovelluksia saadaan odottaa. Visiona on kuitenkin ratkaisu, jossa ikkunan auringonsäteilyn läpäisyä voidaan säädellä valaistus-, lämmitys- tai jäähdytystarpeen perusteella.

Tyhjölaseiteknologiaan on liittynyt voimakkaista odotuksia, mm. U-arvo noin  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ensimmäisissä prototyypeissä on kuitenkin saavutettu taso  $0,8 - 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tuotteen kehityksen täytyy vielä edetä huomattavasti, jotta se olisi kilpailukykyinen kehittyneen eristyslaseiteknikan kanssa. Todennäköisin markkina-alue onkin maat, joissa käytetään yksilasisia ikkunoita. Tällöin yhden lasin tilalle voidaan vaihtaa tyhjölasi, jolloin U-arvosta noin  $5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$  päästään tasolle  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tyhjölasin hintakehitys ratkaisee leviämisen perinteisten eristyslaseien markkina-alueille.

Ikkunoiden ekologisuuden määrää käytännössä sen lämmöneristävyys, koska ikkunoiden valmistukseen käytetty energia on yleensä alle 5 % elinkaaren aikaisesta energiankulutuksesta. Lämmöneristävyuden parantamiseen tarvittava valmistuksen lisäenergia säästetään yleensä ensimmäisen lämmityskauden aikana lämmitysenergiesästäönä. Nykyisten ikkunoiden purkua ja kierrätystä ei ole käytännössä vielä ratkaistu, minkä vuoksi eri ikkunamateriaalien kierrätyksen ekologisuusvaikutuksia ei ole tarkasteltu.

Ikkunan parantamisen energiakustannusvaikutukset kertovat kuluttajalle, kuinka paljon paremmasta tuotteesta kannattaa maksaa, mikäli pelkät energiakustannussäästöt otetaan huomioon. Lisäarvoa hyvin lämpöä eristävän ikkunan valinnasta saadaan viihtyisyyden paremmen kautta. Vastaavasti ikkunavalmistaja saa tietoa siitä, kuinka paljon tuotteen parantamisen lisähinta saa

olla. Projektissa kehitettiin ikkunavalinnan työkalu, jolla em. kustannusarvioita pystytään tekemään paikkakunta- ja rakennuskohtaisesti eri ikkunatyypeille. Ikkunavalintaohjelman tarkoituksena on edistää uuden ikkunateknologian käyttöönottoa.

## LÄHDELUETTELO

- / 1/ Heimonen, Ismo. Measurements of AREL sample. T18/B2/FIN1/94. IEA Task 18 raportti. October 1994. 7 s.
- / 2/ Heimonen, Ismo. Measurements of OKALUX-sample. T18/B2/FIN2/94. IEA Task 18 raportti. December 1994. 6 s.
- / 3/ Heimonen, Ismo. Uudet lasimateriaalit laboratorioista tuotteiksi. Lasirakentajat 1995, nro 1, s. 25 - 26.
- / 4/ Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Ohjeet. 1985. 14 s.
- / 5/ Duer, Karsten. IEA Task 18. B1-aerogels, input data for monolithic aerogel windows. Technical University of Denmark. Working paper. 2 s
- / 6/ Simko, T, et. al. An overview of the technology of vacuum glazing. Conference proceedings. Window Innovations -95. 5-6 June 1995. Toronto. S. 578 - 587.
- / 7/ Guarded and calibrated hot-box. Hot-Box-esite 1996, nro 1. VTT Rakennustekniikka. 1996. 2 s.
- / 8/ Sähkölasi lisää asumisviihtyvyyttä. Esite. Eglas Oy. IVO-viestintäpalvelut; Libris Oy, 1995. 4 s.
- / 9/ Heimonen, Ismo. Economic viability of advanced windows in the Finnish climate. VTT Building Technology, Building Physics. IEA Report T18/A2A3/FIN1/96, July, 1996. 21 s.
- / 10/ Shemeikka, Jari. Ikkunavalinta 1.0, Ikkunoiden energia- ja kustannusanalyysiohjelma. Käyttöohje. 1997. 7 s. + 1 liites.
- / 11/ Aatola, M., Ikkunamateriaalien ekologiset valintaperusteet. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakentamistalous. 1995. 67 s. + 15 liites. Diplomityö.
- / 12/ ETRR Energiataloudelliset rakennukset ja rakennusosat. Energiatutkimusohjelman loppuraportti 1988 - 1992. Helsinki. KTM Katsauksia B:162. 1993. 197 s.
- / 13/ Haahtela, Y. & Kiiras, J., Talonrakennuksen kustannustieto, Uudisrakentaminen. Helsinki; Rakennustieto Oy, 1994. 523 s.
- / 14/ Perälä, A-L, & Kontuniemi, P., Talonrakennuksen energiasisällön muutokset. Tampere; VTT Rakennustalouden laboratorio, 1990. 13 s. + 24 liites.

- / 15/ Saarni, R. Ikkunoiden energiatalous. Tampere; Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakentamistalous, julkaisu 7/1996. 55 s. + 10 liites.
- / 16/ Saarni, R. & Aatola, M., Etuikkunavaihtoehtojen ekologinen tarkastelu. Tampere; Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakentamistalous, 1996. 29 s. + 4 liites.
- / 17/ Heimonen, I. Aerogeelit ikkunarakenteissa, teknologiayhteenveto. Lasirakentaja-lehti 1997, nro 3, s. 30 - 31.
- / 18/ Duer, K & Svendsen, S. B1 Aerogels. Final Project Report (Draft). Working Document T18/B1/WD3/97. February 1997. 23 s.
- / 19/ Heimonen, I. Thermal and solar properties of double glazed aerogel sample (Danish sample). IEA Task 18 raportti T18/B1/FIN4/96. VTT Rakennustekniikka. 4 s.
- / 20/ Collins, R. E. Vacuum Glazing. Japanese Industry Workshop, Nagoya International Centre. 13th March 1997. 6 s.
- / 21/ Katoh, H., Misonou, M. & Kawahara, H. Evaluation of Evacuated Glazing as a Practical Window Glazing. Japanese Industry Workshop, Nagoya International Centre. 13th March 1997. 6 s.
- / 22/ Heimonen, I. Tyhjölasi, teknologiayhteenveto. Lasirakentaja-lehti 1997, nro 2, s. 31.



# PROJEKTIN AIKANA TUOTETTU KIRJALLINEN MATERIAALI

## Lehtiartikkelit

- Heimonen, Ismo. Uudet lasimateriaalit laboratorioista tuotteiksi. Lasirakentajat 1995 nro 1, s. 25 - 26.
- Hemmilä, Kari & Saarni, Risto, Ikkunoiden perusparantamista vauhditetaan kilpailulla. Rakennustaito 1995 nro 9, s. 6 - 7.
- Hemmilä, Kari & Saarni, Risto, Korjausikkunoita kehitetään kilpailulla. Talotekniikka 1996 nro 1, s. 54 - 56.
- Risto Saarni. Energy economy of windows. Finnish Civil Engineering. 1995 nro 3, s. 48 - 50.
- Hemmilä, Kari & Saarni, Risto. Remontti-ikkuna -kilpailu edistää uuden lasiteknologian käyttöä. Lasirakentaja 1996 nro 2, s. 5 - 7.
- Heimonen, Ismo, Hemmilä, Kari & Saarni, Risto. Pientalon ikkunavalinnat. Lasirakentaja 1996 nro 3, s. 5 - 7.
- Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Kondenssi ikkunoiden ulkopintaan. Lasirakentaja 1997 nro 1, s. 6 - 9.
- Heimonen, Ismo. Ikkunoiden aurinkoenergian läpäisysuhde ja sen energiatekninen merkitys. Lasirakentaja 1997 nro 1, s. 14 - 15.
- Heimonen, Ismo. Uuden ikkunateknologian arviointi on IEA Task 18 yhteistyön keskeinen tulos. Lasirakentaja 1997 nro 2, s. 7
- Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Uudet välilistamateriaalit ja niillä saavutettavat hyödyt. Lasirakentaja 1997 nro 2, s. 9 - 11.
- Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Kosteus voi tiivistyä ikkunan eri pinnoille. Rakennustaito 1997 nro 6, s. 18 - 19.

## IEA Task 18 työraportit

- Heimonen, Ismo. Measurements of AREL sample. T18/B2/FIN1/94. IEA Task 18 raportti. October 1994. 7 s.
- Heimonen, Ismo. Measurements of OKALUX-sample. T18/B2/FIN2/94. IEA Task 18 raportti. December 1994. 6 s.
- Heimonen, Ismo. Energy saving potentials of aerogel windows in Finnish climate; simulations, draft. T18/B1/FIN?/94. IEA Task 18 raportti. December 1994. 6 s. + 3 liites.

- Heimonen, Ismo. Calculation of total energy transmittance of advanced glazing systems, Calculation exercise. T18/B12/FIN1/94. IEA Task 18 raportti. August 1994. 10 s + 8 liites.
- Heimonen, Ismo. A2/A3 Modelling and control strategies, Simulation results I. T18/A2A3/FIN1/94. IEA Task 18 raportti. December 1994. 9 s.
- Hemmilä, Kari. Comparison of measured and calculated U-values of Scandinavian windows. T18/B9/FIN1/94. IEA Task 18 raportti. November 1994. 4 s. + 3 liites.
- Heimonen, Ismo. Economic viability of advanced windows in the Finnish climate. VTT Building Technology, Building Physics. IEA Report T18/A2A3/FIN1/96, July, 1996. 21 s.
- Heimonen, Ismo & Hemmilä, Kari. Testing and simulating Finnish super window. T18/B9/FIN1/95. IEA Task 18 raportti. May 1994. 8 s.
- Heimonen, Ismo. Development of the solar simulator into the guarded hot-box environment at VTT Building Technology. Description of the illuminated hot-box & Pilkington sample measurements. T18/B12/FIN1/95. IEA Task 18 raportti. November 1994. 12 s.+ 3 liites.
- Heimonen, Ismo. Thermal and solar properties of double glazed aerogel sample (Danish sample). IEA Task 18 raportti T18/B1/FIN4/96. VTT Rakennustekniikka. 4 s.
- Saarni, Risto & Aatola, Martti. Environmental impacts of manufacturing and use of Finnish type window. IEA Task 18 raportti T18/A4/FIN1/96. TTKK Rakentamistalouden laitos. 10 s.

### **Konferenssijulkaisut**

- Sullivan, R., Heimonen, I., Simmler, H., Lyons, P. & Andresen, I. Energy simulation studies in IEA/SHC Task 18 Advanced Glazing and Associated Materials for Solar and Building Applications. Window Innovations conference '95, 5-6th June 1995, Toronto. 9 s. + 15 liites.
- Hemmilä, Kari. Simulation as a design tool for designing advanced windows. Window Innovations conference '95, 5-6th June 1995, Toronto. 7 s.

### **Opinnäytteet**

- Saarni, R. Ikkunoiden energiatalous. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Rakentamistalous. 1996. 55 s. + 10 liites. Lisensiaatintutkimus.