

Eristyslasin täytekaasun ja lasien toimivuus ja toteaminen

Kari Hemmilä & Ismo Heimonen

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5448-5 (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5449-3 (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, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT

tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusfysiikka, talo- ja palotekniikka, Lämpömiehenkuja 3, PL 1804, 02044 VTT

puh. vaihde (09) 4561, faksi (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 VTT, Finland

phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 455 2408

Toimitus Maini Manninen

Libella Painopalvelu Oy, Espoo 1999

Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Eristyslasin täytekaasun ja lasien toimivuus ja toteaminen [The detection and functionality of insulating unit filling gases and glass panes]. Espoo 1999, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1963. 43 s.

Avainsanat insulating glass, insulating gas, functionality detection, filling gas, measurement, concentration, low-emissivity glass, thermal insulation, windows, quality control

TIIVISTELMÄ

Uuden kehittyneen lasiteknologian, selektiivilasien ja eristyslasien täytekaasujen soveltaminen on parantanut merkittävästi ikkunoiden lämmöneristävyttä. Kehittyneiden lasiosien toteaminen ikkunasta on kuitenkin silmämääräisesti osittain mahdotonta ja osittain hyvin vaikeaa. Erityisesti ongelmia tuottavat eristyslasin täytekaasun tyypin ja täyttöasteen määrittäminen, mutta myös lasien paksuuksien ja niiden välisten etäisyyksien määrittäminen sekä selektiivilasien toteaminen ei onnistu ilman apuvälineitä. Edellä mainittujen tekijöiden määrittäminen on kuitenkin tarpeen eristyslasi- ja ikkunatehtaiden laadunvalvonnan vuoksi. Lisäksi asiakkailta tulee olla mahdollisuus tarkistaa ikkunaa rikkomatta, että he ovat saaneet ne lasiosat ja täytekaasut, joista he ovat sopineet ja maksaneet. Nykyisin tätä vaatimusta ei pystytä täyttämään täytekaasun tunnistamisen osalta, koska tarvittavia mittalaitteita ei ole saatavilla.

Täytekaasujen käytön suurin ongelma on se, että kaasun tyyppiä ja määrää ei pystytä nykyisin mittaamaan lasin läpi, vaan mittaus vaatii näytteenoton kaasusta. Tämän seurauksena eristyslasivalmistajat eivät ole pystyneet luomaan riittävän kattavaa laadunvalvontaa kaasutäytteisille eristyslaseille. Laadunvalvonnan puuttuminen ja se, ettei ostaja voi varmistua kaasun tyypistä ja määrästä, aiheuttaa ostajien keskuudessa epäluottamusta kaasutäyttöä kohtaan.

Tutkimuksessa tarkasteltiin eristyslasiä rikkomattoman täytekaasuntunnistuksen fysikaalisia ja kemiallisia perusteita sekä tähän tarkoitukseen soveltuvia käytössä olevia laitteita. Lisäksi selvitettiin ikkunan lasiosan muiden tekijöiden selvittämiseen soveltuvia ainetta rikkomattomia määrittämenetelmiä, laitteita ja niiden teoreettisia perusteita.

Lupaavimmaksi täytekaasun tunnistusmenetelmäksi osoittautui kaasun tunnistaminen sähkökentällä viritetyn kaasun emittoimasta säteilystä. Tähänkään menetelmään ei ollut valmiita mittalaitteita. Mittaustekniikan kehitystyö jatkuu Helsingin yliopiston fysikaalisen kemian laitoksella ja on todennäköistä, että tämän pohjalta on mittalaitteita saatavilla vuoden 2000 alussa.

Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Eristyslasin täytekaasun ja lasien toimivuus ja toteaminen [The detection and functionality of insulating unit filling gases and glass panes]. Espoo 1999, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1963. 43 p.

Key words insulating glass, insulating gas, functionality detection, filling gas, measurement, concentration, low-emissivity glass, thermal insulation, windows, quality control

ABSTRACT

New advanced glass technology, low-emissivity coated glass panes and filling gases of insulating glass units have improved substantially the thermal insulation of windows. To detect these advanced window components by eye is either impossible or very difficult. It is especially difficult to detect the type and the concentration of filling gas. Tools are also needed to measure glass thicknesses and air gaps of windows. These tools are needed for quality control by insulating glass unit manufacturers. Customers must also have the possibility to check the windows with non-destructive methods to ensure that they have received what they have paid for.

Currently it is not possible to check the filling gas through a glass pane. The only way is to take a sample through a spacer. Therefore insulating glass manufacturers have not been able to create adequate quality control for gas filled insulating glass units. The lack of quality control and the fact that customers can't check the type and the concentration of the filling gas have caused distrust of gas filled insulating glass units.

In this report many physical and chemical methods were studied and their ability to detect filling gas non-destructively were estimated and equipment that can be used for that purpose were sought. Also equipment that can be used to detect low-e coatings, glass pane thicknesses, air gaps and the emissivity of a glass surface were investigated.

The most promising method turned out to be the method that detects the filling gas and its concentration from the light emission of an electrical discharge. There are no available equipment for this method, but development is going on at University of Helsinki in the Laboratory of Physical Chemistry. It is probable that the meter will be on the market in the beginning of the year 2000.

ALKUSANAT

Tämä raportti on tutkimuksen “Selektiivisten pinnoitteiden ja täytekaasujen toimivuus ja toteaminen” loppuraportti. Projektia ovat rahoittaneet Tekes, Eristyslasiyhdistys ry., Rakennustuoteteollisuusyhdistys, Woikoski Oy, ympäristöministeriö ja VTT Rakennustekniikka.

Projektiryhmään ovat osallistuneet toiminnanjohtaja Mauri Riikonen Eristyslasiyhdistys ry:stä, johtaja Markku Leinos Rakennustuoteteollisuusyhdistyksestä, tekninen johtaja Kalevi Korjala Woikoski Oy:stä, yli-insinööri Pekka Kalliomäki ympäristöministeriöstä sekä tutkijat Kari Hemmilä ja Ismo Heimonen VTT Rakennustekniikasta.

Tutkimuksen aikana Helsingin Yliopiston fysiikan laitoksen professori Mauri Luukkala teki alustavia kokeita kaasun ja täyttöasteen tunnistamiseksi ultraääni-menetelmällä. Helsingin Yliopiston kemian laitoksen fysikaalisen kemian laboratorion apulaisprofessori Markku Räsänen, tutkija Mika Pettersson ja tutkija Leonid Khriachtchev tekivät alustavia kokeita kaasun ja täyttöasteen tunnistamiseksi ionisoidun kaasun emittoiman säteilyn perusteella.

Kiitämme rahoittajien edustajia heidän panoksestaan projektin tavoitteiden saavuttamisessa sekä edellä mainittuja Helsingin yliopiston tutkijoita heiltä saamastamme arvokkaasta avusta projektissamme. Lisäksi kiitämme toimitusjohtaja Juhani Liiriä Lasiliiri Oy:stä, kun saimme käyttää Lasiliiri Oy:n laitteita ja henkilökuntaa tutkimuksessamme.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
SYMBOLILUETTELO.....	7
1 JOHDANTO	8
2 IKKUNAN LASIOSA.....	9
2.1 Lasiosan vaikutus ikkunassa	9
2.2 Lasien paksuuksien ja etäisyyksien mittaaminen	11
3 SELEKTIIVILASIT	13
3.1 Selektiivilasien vaikutus ikkunassa.....	13
3.2 Selektiivilasien toteaminen ikkunasta.....	15
3.3 Selektiivilasien emissiviteetin mittaaminen.....	16
3.4 Selektiivilasin käytettävyys erillislasina.....	18
3.4.1 Selektiivilasin pesunkestävyys	18
3.4.2 Selektiivilasin säärasitusten kestävyys	19
3.4.3 Selektiivilasin likaantumisen vaikutus ominaisuuksiin	20
3.4.4 Yhteenvedo selektiivilasin rasitustenkestävyydestä.....	21
4 TÄYTEKAASUT	22
4.1 Eristyslasin täytekaasujen vaikutus ikkunassa	23
4.2 Täytekaasun pysyvyys eristyslasissa	24
4.3 Täytekaasun fysikaaliset toteamismenetelmät	27
4.3.1 UV- tai IR-säteilyn absorptio	27
4.3.2 Radioaktiivisen säteilyn absorptio	27
4.3.3 Ionisoidun kaasun emittoiman säteilyn spektri	27
4.3.4 Muutokset dielektrisyysvakiossa.....	28
4.3.5 Muutos läpilyöntijännitteessä.....	28
4.3.6 Muutos äänennopeudessa.....	29
4.3.7 Muutos ultraäänen absorptiossa	31
4.3.8 Muutos kaasun tiheydessä.....	31
4.3.9 Muutos kaasun lämmönjohtavuudessa.....	32
4.4 Täytekaasun kemialliset toteamismenetelmät	32
4.5 Ainetta rikkomattomien tunnistusmenetelmien arviointi.....	32
4.6 Täytekaasun määrittäminen näytteenotolla	33
4.7 Eristyslasien täyttäminen.....	34
4.7.1 Kaasutäytön teoria.....	34
4.7.2 Kaasutäytön menetelmät	36
4.7.3 Kaasutäytön kokeet	38
5 YHTEENVETO	42
LÄHDELUETTELO	43

SYMBOLILUETTELO

α	valonsäteen säteen kulma ($^{\circ}$)
δ	Stefan-Boltzmanin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
$\bar{\varepsilon}$	efektiivinen emissiviteetti (-)
ε	pinnan emissiviteetti (-)
γ	kaasukohtainen adiabaattivakio
τ	aikavakio (-)
C_p	kaasun ominaislämpö vakiopaineessa
C_v	kaasun ominaislämpö vakiotilavuudessa
c	kaasutilan konsentraatio
e	luonnonlogaritmin kantaluku (2,71828...)
E_a	diffuusion aktivointienergia (J/mol)
T_m	lasien keskimääräinen lämpötila (K)
M	moolimassa (kg/kmol)
n	valon taitekerroin (-)
$P(T)$	diffuusionopeus lämpötilassa T
q_v	tilavuusvirta (m^3/s)
R	ideaalikaasun vakio ($8,3145 \text{ Pa m}^3/(\text{K mol})$)
T	lämpötila (K)
t	aika (s)
V	tilavuus (m^3)

1 JOHDANTO

Uuden kehittyneen lasiteknologian, selektiivilasien ja eristyslasien täytekaasujen käyttöönotto on parantanut merkittävästi ikkunoiden lämmöneristävyyttä. Kehittyneiden lasiosien toteaminen ikkunasta on kuitenkin silmämääräisesti osittain mahdotonta ja osittain hyvin vaikeaa. Erityisesti ongelmia tuottavat eristyslasin täytekaasun tyyppin ja täyttöasteen määrittäminen, mutta myös lasien paksuuksien ja lasien välisten etäisyyksien mittaaminen sekä selektiivilasien toteaminen tuottavat vaikeuksia. Näiden ominaisuuksien määrittäminen on kuitenkin tarpeen eristyslasi- ja ikkunatehtaiden laadunvalvonnan vuoksi. Lisäksi asiakkailta tulee olla mahdollisuus tarkistaa ikkunaa rikkomatta, että he ovat saaneet ne lasiosat ja täytekaasut, joista he ovat sopineet ja maksaneet. Nykyisin tätä vaatimusta ei pystytä täyttämään täytekaasun tunnistamisen osalta, koska tarvittavia mittalaitteita ei ole saatavilla.

Eristyslasien valmistuksen laadunvalvonnassa reunatiivistyksen kestävyys ja toiminta on varsin hyvin kontrolloitua säännöllisesti tehtävien vanhennuskokeiden avulla. Reunatiivistyksen kestävyysvalvonta ei vaadi jokaisen elementin tarkistamista, vaan riittää, että tehdään tyyppitestit jokaiselle massa-välilista-yhdistelmälle ja säännöllisin välein tuotannosta otettaville näytteille. Sen sijaan kaasutäytössä on monta täyttöastetta huonontavaa tekijää, minkä vuoksi optimitilanteessa eristyslasitehtaalla tulisi olla käytössä nopea mittausjärjestelmä, jolla pystytään mittaamaan kaikkien valmistettujen lasien kaasun tyyppi ja täyttöaste. Mittaustulokset voidaan kirjoittaa jokaiseen eristyslasiin liimattavaan tarraan, jolloin ikkunatehtaassa on luotettava tieto yksittäisen eristyslasin ominaisuuksista.

Eristyslasien täytekaasunmittarin tarve on tiedostettu monissa maissa ja mittausmenetelmiä tutkitaan Suomen lisäksi myös Kanadassa ja Saksassa. Nämä tutkimukset ovat vasta alustavia laboratoriokokeita, joiden pohjalta mahdollista mittaria kehitetään.

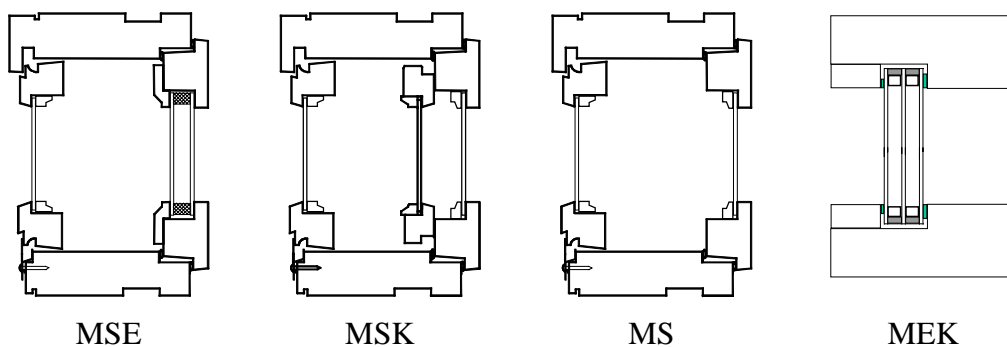
Tässä tutkimuksessa tarkastellaan teoreettisesti mahdollisuuksia määrittää eristyslasin sisällä olevan kaasun tyyppi ja täyttöaste. Eri menetelmien soveltuvuutta ja rajoituksia tarkastellaan sekä karsitaan pois sellaiset menetelmät, jotka eivät ole lainkaan käyttökelpoisia.

Kaasuseoksen kaasut voidaan tunnistaa kemiallisten reaktioiden tai analyysien perusteella tai jonkin fysikaalisen ominaisuuden perusteella. Kemialliset menetelmät ovat aukottomia, jolloin virheiden mahdollisuus on vähäinen. Useimmat fysikaaliset menetelmät soveltuvat lähinnä muutaman kaasun erottamiseen toisistaan ja pitoisuuksien määrittämiseen kahden kaasun seoksista.

2 IKKUNAN LASIOSA

Tavallisen ikkunan lasiosa edustaa yleensä yli puolta koko ikkunan pinta-alasta ja lasijulkisivussa lähes koko pinta-alaa. Tämän vuoksi lasiosalla on ratkaiseva vaikutus ikkunan lämmön- ja ääneneristävyyteen sekä optisiin ja visuaalisiin ominaisuuksiin.

Suomalainen ikkuna poikkeaa rakenteeltaan muista eurooppalaisista ikkunoista. Keski-Euroopassa ikkunat ovat tavallisesti yksipuitteisia avattavia tai kiinteitä eristyslasi-ikkunoita. Ruotsissa on käytössä myös kaksipuitteisia ikkunoita, mutta niiden puitteet on yleensä kytketty toisiinsa ja ne irrotetaan vain pesua varten. Suomessa puitteita on tavallisimmin kaksi ja ne avautuvat erikseen (kuva 1).



Kuva 1. Suomalaisia nykyisin valmistettavia ikkunatyyppejä.

Näistä MSE-tyyppi on nykyisin yleisin ja MSK-ikkunan osuus pienenee jatkuvasti. Kaksipuitteista ja kaksilasista MS-ikkunaa myydään jonkin verran kesämökkien ikkunaksi ja kiinteää MEK-ikkunaa jonkin verran pientaloihin.

Suomalaisten kaksipuitteisten ikkunoiden etuna yksipuitteisiin ja kiinteisiin eristyslasi-ikkunoihin verrattuna on parempi ääneneristävyys ja suurempi karmi-syvyys.

Tämän tutkimuksen kannalta eristyslasi-ikkunat MSE ja MEK ovat kiinnostavimmat, sillä niissä voidaan käyttää uutta lasiteknologiaa. Näiden ikkunoiden lasien, lasivälien ja eristyslasiin täytekaasun varmentaminen ainetta rikkomattomalla menetelmällä on usein tarpeen.

2.1 LASIOSAN VAIKUTUS IKKUNASSA

Tavallisilla laseilla varustetun ikkunan lasiosan lämmöneristävyys on yhtä hyvä tai huonompi kuin karmi- ja puiteosan lämmöneristävyys. Selektiivilaseilla ja täytekaasulla varustetussa ikkunassa tilanne on päinvastainen. Tämän vuoksi lasiosalla on ratkaiseva asema ikkunan lämmöneristävyydessä.

Puuikkunoiden karmi- ja puiteosan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin on noin $1,4 - 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Metallikarmisilla ikkunoilla arvo on noin $2 - 3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Opti-

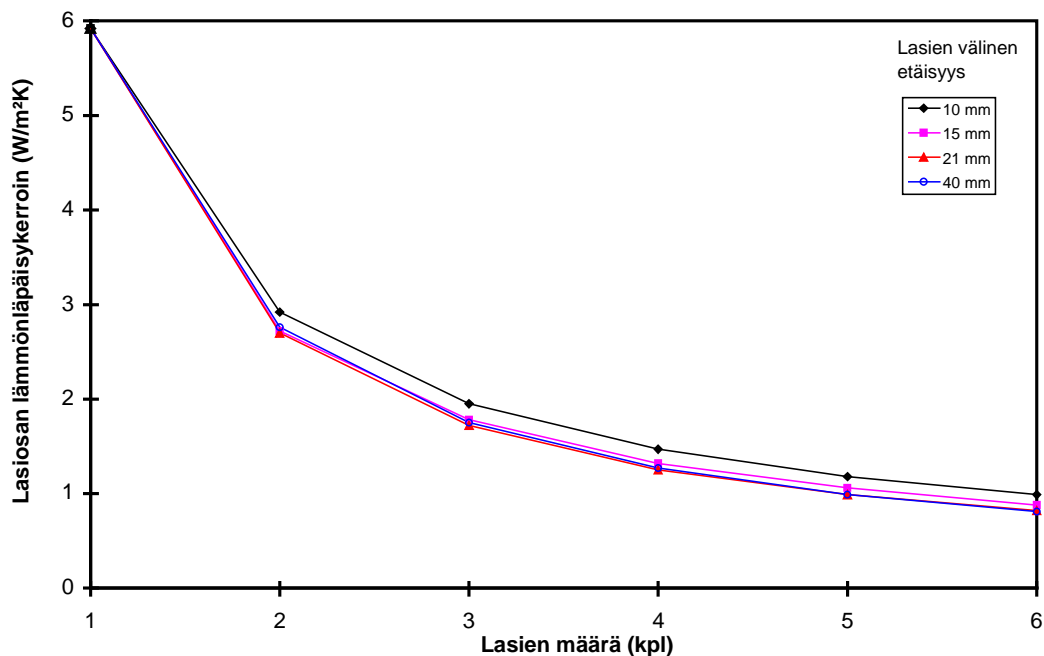
maalisessa tilanteessa lasiosan ja karmin lämmöneristävyys ovat yhtä suuria, jolloin ikkunan lämmönläpäisykerroin on koosta riippumaton.

Karmi- ja puiteosan lämmöneristävyydelle ei nykyisissä määräyksissä ole vaatimuksia. Tämä on johtanut siihen, että valmistajat parantavat vain lasiosan lämmöneristävyyttä ja joissain tapauksissa ilmoittavat vain lasiosan U-arvon.

Taulukossa 1 on arvioitu niitä vaikutuksia, joita ikkunan lasiosan eri komponenteilla on ikkunan lämmön- ja ääneneristävyyteen, lujuuteen sekä säteilynläpäisyominaisuuksiin. Kuvassa 2 on esitetty lasien määrän vaikutus ikkunan valoaukon keskikohdan lämmönläpäisykerroimeen. Kuvassa 6 on esitetty selektiivilasin ja täytekaasun tyypin vaikutus 1 200 mm * 1 200 mm -kokoisen ikkunan keskimääräiseen lämmönläpäisykerroimeen.

Taulukko 1. Lasiosan vaikutus ikkunan teknisiin ominaisuuksiin.

	Lämmöneristävyys	Ääneneristävyys	Valon läpäisy	Auringon säteilyn läpäisy	Lujuus ja kestävyys
Lasin paksuus	pieni	suuri	pieni	pieni	suuri
Lasien etäisyys	kohtalainen	kohtalainen	ei vaikuta	pieni	ei vaikuta
Lasien määrä	suuri	suuri	kohtalainen	kohtalainen	kohtalainen
Eristyslasin täytekaasu	kohtalainen	pieni	ei vaikuta	ei vaikuta	ei vaikuta
Selektiivilasin tyyppi	suuri	ei vaikuta	kohtalainen	kohtalainen	ei vaikuta
Auringonsuojalasi	ei vaikuta	ei vaikuta	suuri	suuri	ei vaikuta

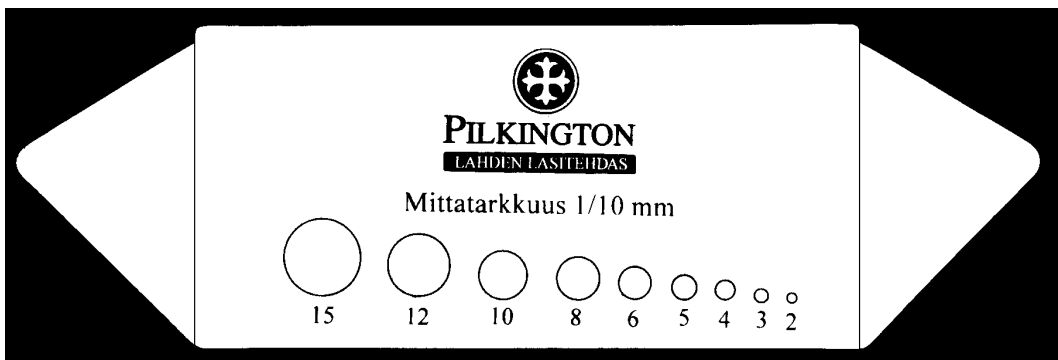


Kuva 2. Lasien määrän ja etäisyyksien vaikutus lasiosan lämmönläpäisykerroimeen.

2.2 LASIEN PAKSUUKSIEN JA ETÄISYYKSIEN MITTAAMINEN

Lasien paksuuden ja lasien välisten etäisyyksien mittaaminen paikalleen asennetusta ikkunasta on vaikeaa ilman erikoislaitteita. Ikkunan avattavien puitteiden yksittäisten lasien paksuuden mittaamisessa voidaan käyttää mittakelloa, mutta kiinteiden lasitusten ja eristyslasiin mittaamiseen sitä ei voi käyttää. Tämän tyyppisten lasien mittaamiseen on kehitetty erilaisia optisia ja valo-optisia menetelmiä ja mittareita. Ne perustuvat siihen tietoon, että ikkunalasin valontaitekerroin on noin 1,52. Mittareissa mitataan lasin eri pinnoista heijastuneiden kuvien tai valonsäteiden välisiä etäisyyksiä.

Yksinkertaisimmillaan mittari on muovinen siivekkeillä varustettu levy, johon on painettu eri kokoisia ympyröitä (kuva 3). Siivekkeiden avulla muovilevy asetetaan 45°:n kulmaan mitattavan lasin pinnalle. Lasin etu- ja takapinnasta heijastuvaa kuvaa tarkastellaan myös 45°:n kulmassa. Lasin paksuus on se, jota vastaavat heijastuneet ympyrät sivuavat toisiaan.



Kuva 3. Heijastukseen perustuva yksinkertainen lasinpaksuuden mittari.



Kuva 4. Lasin paksuuden mittari (Merlin Lazer).

Kuvassa 4 on eräs valo-optinen mittari, joka perustuu siihen, että mittarista 45° :n kulmassa tuleva lasersäde heijastuu lasin pinnoilta mittarin asteikolle. Tässä mittarissa on etuna, että sillä voidaan mitata kaikkien lasien paksuudet ja lasien väliset etäisyydet samalla kertaa. Lisäksi mittarin avulla voidaan todeta kaikki ikkunassa olevat selektiiviset lasit ja selektiivisten pintojen sijainnit sekä laminoitujen lasien kerrosten määrä ja paksuudet.

Mittarin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5. Tuleva lasersäde taittuu lasiin tullessaan valo-opin kaavan mukaisesti:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad (1)$$

missä

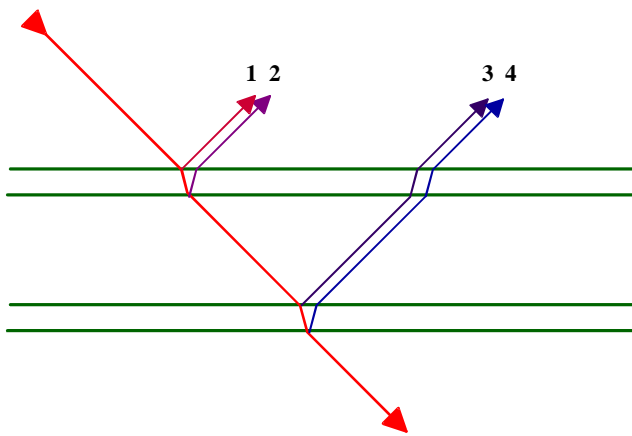
n_1 = ilman taitekerroin (= 1)

n_2 = lasin taitekerroin (= 1,52)

α_1 = säteen tulokulma lasiin ($^\circ$)

α_2 = säteen kulma lasissa ($^\circ$)

Kaavasta voidaan laskea, että säteen tulokulman ollessa 45° , säde taittuu lasiin tullessaan $27,7^\circ$:seen. Tällöin lasin eri pintojen heijastusten väli on $1,05 \cdot$ lasin paksuus. Lasinpaksuudet voidaan mitata 1. ja 2. sekä 3. ja 4. heijastuneen säteen välisistä etäisyyksistä. Lasien välinen etäisyys on puolet 2. ja 3. heijastuneen säteen välisestä etäisyydestä.



Kuva 5. Lasinpaksuuden mittarin toimintaperiaate.

3 SELEKTIIVILASIT

Selektiivilasilla tarkoitetaan läpinäkyvällä, ohuella metalli- tai metallioksidikerroksella pinnoitettua lasia, jonka säteilynläpäisy ja säteilyn heijastusominaisuudet ovat säteilyn aallonpituudesta riippuvia (selektiivisiä). Tämän kerroksen tarkoituksena on vähentää ikkunan lasien välistä lämpösäteilyä ja näin parantaa ikkunan lämmöneristävyyttä. Tästä lasista käytetään myös nimitystä matalaemissiviteetti-pinnoitettu lasi (low-e-lasi). Metallikerroksen paksuus on yleensä välillä 5 ... 100 nm. Selektiivinen metallikerros heijastaa lämpöä sitä paremmin mitä paksumpi se on, mutta toisaalta paksuuden kasvattaminen pienentää valon ja auringon lämpösäteilyn läpäisyä. Pinnoitteen selektiivisiin ominaisuuksiin vaikuttaa pinnoitteen paksuuden ohella myös pinnoitteen materiaali ja pinnoitekerrosten määrä ja tyypit.

Selektiivisiä laseja on kahden tyyppisiä: kovapinnoitettuja ja pehmeäpinnoitettuja laseja. Kovapinnoitettu selektiivilasi valmistetaan float-linjan jatkona olevassa linjassa, jossa kuuman lasilevyn pintaan tuleva ohut metallikerros reagoi lasin kanssa ja muodostaa pysyvän sidoksen.

Pehmeäpinnoitettu selektiivilasi valmistetaan erillisessä jälkikäsitteilylaitoksessa, jossa lasilevyn pintaan sputteroidaan (ruiskutetaan tyhjässä) yksi tai usempia pinnoitekerroksia. Tässä valmistusmenetelmässä metallikerrokset eivät reagoi lasin kanssa eikä selektiivinen pinta ole mekaanisesti ja kemiallisesti yhtä kestävä kuin kovapinnoitetun lasin pinta. Pehmeäpinnoitetun lasin etuna on kovapinnoitettua lasia pienempi emissiviteetti.

3.1 SELEKTIIVILASIIEN VAIKUTUS IKKUNASSA

Lämpö siirtyy ikkunan lasien välissä kaasuvirtauksen mukana, johtumalla ja säteilemällä. Säteily voidaan jaotella lyhytaaltoiseen ja pitkäaaltoiseen. Maan pinnalle tuleva auringonsäteily on lyhytaaltoista (200 ... 2 500 nm), ja se pitää lämpösäteilyn lisäksi sisällään myös ultraviolettisäteilyn sekä näkyvän valon. Pitkäaaltoista säteilyä (2,5 ... 100 μm) lähettävät huonelämpötilassa olevat pinnat, kuten seinät, ikkunan lasit ja ihmisten iho. Ikkunalasi läpäisee vain lyhytaaltoista säteilyä eikä lainkaan pintojen pitkäaaltoista säteilyä. Tämän vuoksi lasien välinen pitkäaaltoinen säteily vaikuttaa oleellisesti ikkunan lämmöneristävyYTEEN.

Tavallisilla laseilla varustetussa ikkunassa lasien välisen säteilyn osuus on noin puolet valoaukon lämpöhäviöstä ja toinen puoli aiheutuu lämmönjohtumisesta kaasussa ja kaasuvirtausten mukanaan kuljettamasta lämmöstä. Pitkäaaltoiseen säteilylämmönsiirtoon pintojen välillä vaikuttaa pintojen emissiviteetti. Säteilylämmönsiirtokerroin kahden, likimäärin saman lämpöisen lasin välillä on yksinkertaistettavissa muotoon:

$$h_r = 4\delta\bar{\epsilon}T_m^3 \quad (2)$$

missä

$\delta =$ Stefan-Boltzmanin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

$\bar{\varepsilon} =$ efektiivinen emissiviteetti (-)

$T_m =$ lasien keskimääräinen lämpötila (K)

Kahden yhdensuuntaisen tasopinnan välinen efektiivinen emissiviteetti on:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3)$$

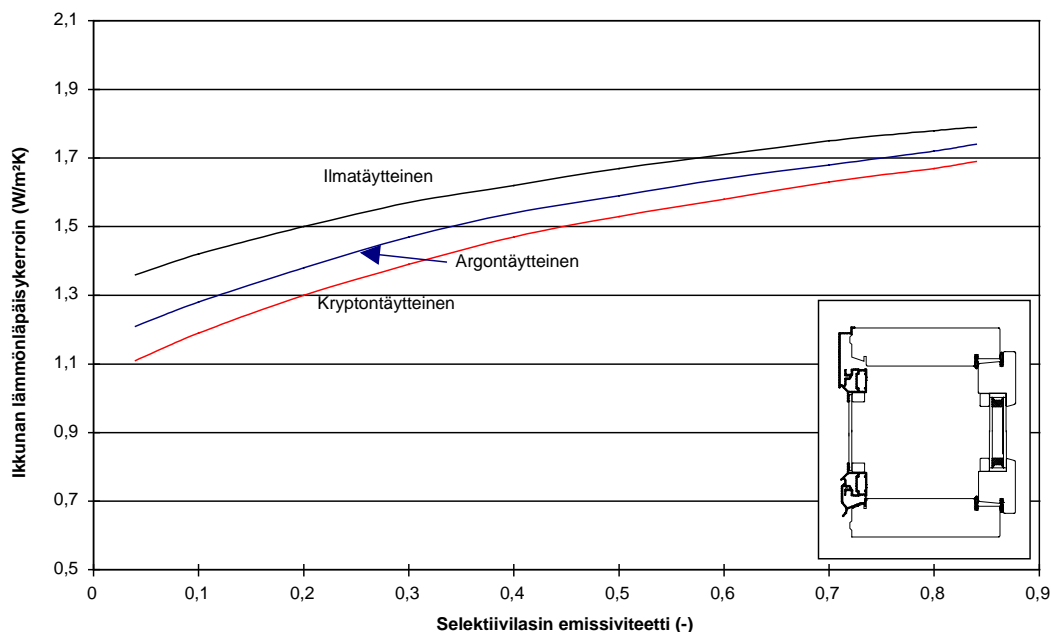
missä

$\varepsilon_1 =$ pinnan 1 emissiviteetti (-)

$\varepsilon_2 =$ pinnan 2 emissiviteetti (-)

Pinnoittamattoman float-lasin emissiviteetti on noin 0,84 ja selektiivilasien pienimmät emissiviteetit ovat noin 0,04. Mustan täysin heijastamattoman pinnan emissiviteetti on 1 ja kirkkaan täysin heijastavan pinnan emissiviteetti on 0.

Kuvassa 6 on esitetty alumiinisella ulkopuiteella varustetun MSE-ikkunan keskimääräinen lämmönläpäisykerroin erilaisilla selektiivilaseilla. Lämmönläpäisykerroimet on laskettu myös argon- ja kryptontäytteistä eristyslasia käyttäen, jolloin kuvasta on havaittavissa myös kaasun lämmönjohtavuuden ja muiden lämpö- ja virtausteknisten ominaisuuksien vaikutus.



Kuva 6. Selektiivilasin emissiviteetin vaikutus alumiinisella ulkopuiteella varustetun 1,2 m * 1,2 m -kokoisen ikkunan keskimääräiseen lämmönläpäisykerroimeen.

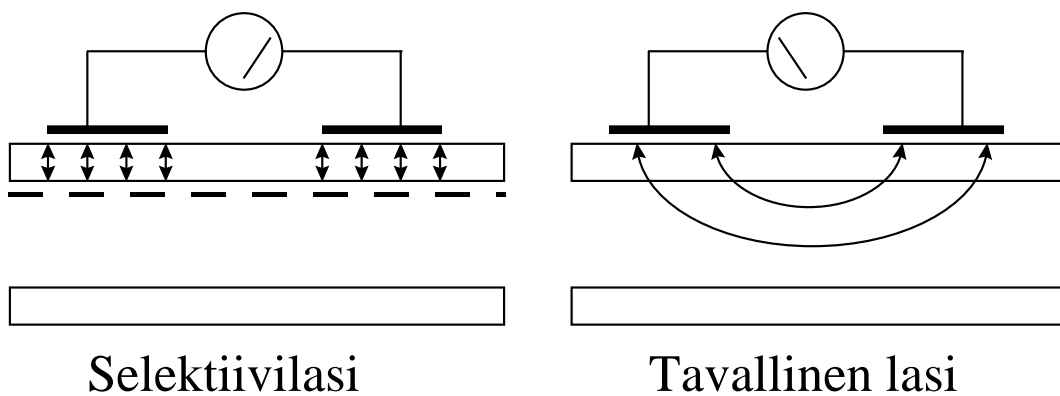
3.2 SELEKTIIVILASIIEN TOTEAMINEN IKKUNASTA

Selektiivinen pinnoite on metallia ja se johtaa sähköä. Lisäksi selektiivilasi heijastaa valoa enemmän kuin tavallisen lasin pinta. Näitä tietoja voidaan käyttää hyödyksi selektiivilasin tunnistuksessa.

Kapasitiivisessa mittarissa johdetaan vaihtojännitettä lasin pinnalle asetettavien elektrodien välille. Mittari voi olla joka selektiivilasin tunnistusta varten tehty (kuva 7) tai jokin vastaava, esimerkiksi puunkosteuden mittari. Menetelmässä mitataan elektrodien välisen virran voimakkuutta. Selektiivilasi aiheuttaa suuremman virran kuin tavallinen lasi (kuva 8). Tätä menetelmää ei kuitenkaan voi soveltaa kolmi- tai nelilasisten eristyslasien keskimmäisten lasien tarkastamiseen.

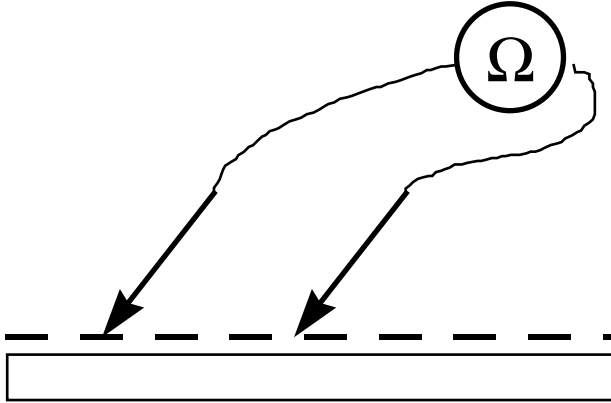


Kuva 7. Selektiivilasin tunnistamiseen tehty mittari (Pilkington).



Kuva 8. Selektiivilasin toteaminen kapasitiivisella mittarilla.

Irrallaan olevasta selektiivilasista pinnoitteen voi todeta vastusmittarin avulla. Lasin pinnoitettu puoli johtaa sähköä, koska pinnoite on metallia. Pinnoittamaton puoli ei johda, koska lasi on eriste (kuva 9).



Kuva 9. Selektiivisen pinnan toteaminen vastusmittarilla

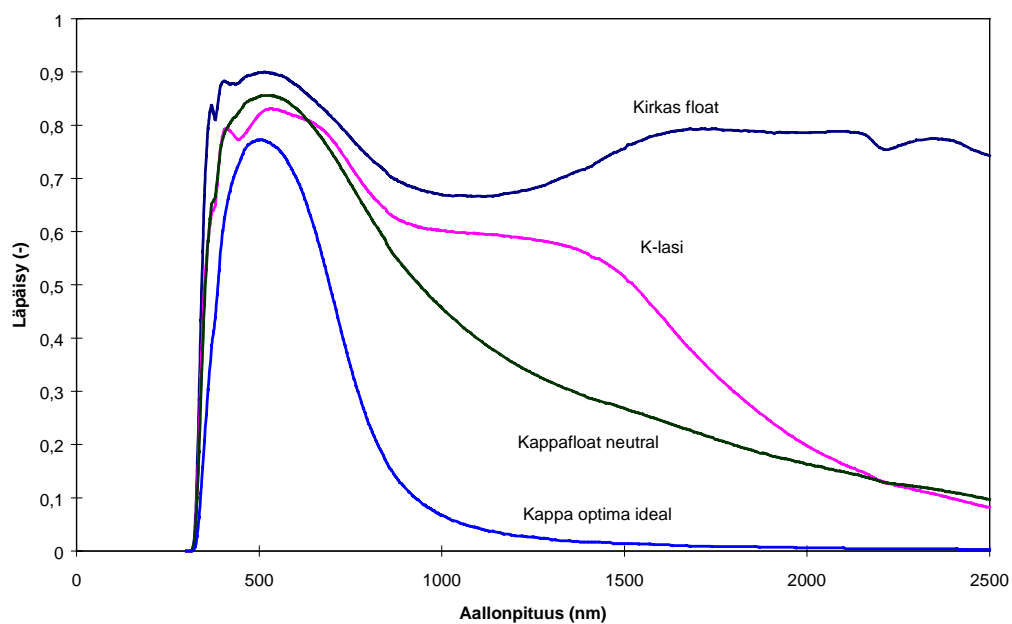
Selektiivinen pinta heijastaa valoa paremmin kuin pinnoittamaton. Tätä tietoa on käytetty hyväksi selektiivilasin toteamisessa liekin avulla. Menetelmä ei ole kuitenkaan kovin luotettava ja vaatii havainnoitsijalta kokemusta. Sen sijaan kuvassa 4 esitetyllä lasinpaksuudenmittarilla selektiivilasi voidaan havaita luotettavasti. Selektiivipinnasta tulevan heijastuksen viiva on kirkkaampi kuin muut viivat.

3.3 SELEKTIIVILASIIEN EMISSIVITEETIN MITTAAMINEN

Selektiivilasin emissiviteetti on pintaominaisuus, minkä vuoksi se tulee mitata tutkittavalta pinnalta. Selektiivilasissa arvon mittaaminen toiselta pinnalta on siinäkin mielessä mahdotonta, että lasi ei läpäise sitä aallonpituusalueita, joka on lämmöneristysmielessä kiinnostava. Tämän vuoksi selektiivilasin emissiviteettiä ei voi mitata rikkomatta eristyslasiä.

Yksi tapa yrittää tunnistaa selektiivilasin tyyppi on verrata eristyslasin valonläpäisyominaisuuksia, esimerkiksi läpi tulevan valon värilämpötilaa, tunnettuihin laseihin. Toinen vaihtoehto on verrata eristyslasin pinnassa olevan selektiivilasin valonheijastusominaisuuksia tunnettuihin laseihin. Näissä molemmissa menetelmissä on ongelmana, että lasin paksuudet vaikuttavat ominaisuuksiin ja vaativat samanpaksuiset vertailulasit, jotta menetelmä olisi luotettava. Lisäksi menetelmällä ei pysty mittaamaan tuntemattoman lasin emissiviteettiä, koska menetelmä tunnistaa vain lasityypin.

Kuvassa 10 on esitetty eräiden Pilkingtonin valmistamien 6 mm paksujen lasien läpäisy. Jos läpäisyominaisuudet eri lasilla eroavat merkittävästi toisistaan, kuten kuvan Kappa optima idealilla ja K-lasilla, ne pystytään erottamaan toisistaan. Sen sijaan kahden keskimmäisen lasin erottaminen toisistaan voi olla silmämääräisesti vaikeaa.



Kuva 10. Erilaisten 6 mm paksujen lasien läpäisy [15].

Selektiivilasin emissiviteetti mitataan yleensä spektrofotometrin avulla aallonpituuskaistoittain ja tuloksista lasketaan painotettu keskiarvo standardin /13/ mukaisesti.



Kuva 11. Pinnan emissiviteetin mittari Emissiometer Mk II.

Mikäli ei tarvita niin tarkkaa mittaustulosta, emissiviteetti voidaan mitata koko säteilykaistan alueelta tarkoitusta varten tehdyllä mittarilla. Kuvassa 11 on esitetty eräs tällainen mittari.

Mittari on ruotsalaisvalmisteinen Emissiometer MK II, jonka ilmoitettu mittaus-tarkkuus on $\pm 0,01$ yksikköä. Mitattu emissiviteettiarvo on aallonpituusalueen 4 - 50 μm keskimääräinen arvo. Mittari lähettää mitattavaan pintaan lämpösäteilyä pinnasta, joka on noin 10 °C ympäristöä lämpimämpi. Mittari mittaa tutkittavalta pinnalta heijastuvan säteilyn määrän ja laskee tämän perusteella emissiviteetti-arvon. Mittari kalibroidaan yhdellä tunnetulla pienemmissiviteettisellä pinnalla ja yhdellä suuremissiviteettisellä pinnalla.

3.4 SELEKTIIVILASIN KÄYTETTÄVYYS ERILLISLASINA

Jotta selektiivilasia voitaisiin käyttää erillislasina, sen tulee kestää ilmaston, puhdistamisen ja käsittelyn aiheuttamat rasitukset. Pehmeäpintainen selektiivilasi ei kestä näitä rasituksia. Kovapintaisen lasin tiedetään kuitenkin olevan kestävyysdeltään parempi ja sitä on joissain tapauksissa käytetty myös erillislasina. Lasinvalmistaja ei kuitenkaan anna lasille kestävyystakuuta tämän tyyppisessä käytössä, vaan riski on ikkunavalmistajalla ja kuluttajalla.

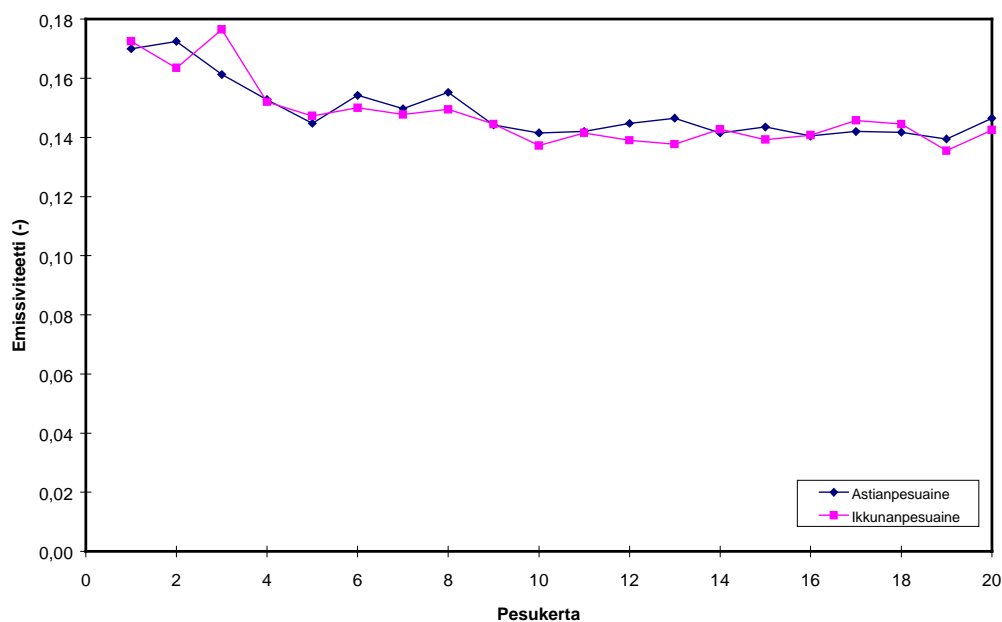
Tässä tutkimuksessa pyrittiin kartoittamaan muutamalla yksinkertaisella kokeella kovapintaisen selektiivilasin toimivuutta erillislasina. Koelasiksi valittiin Pilkingtonin valmistama K-lasi. Tutkittaviksi ominaisuuksiksi valittiin pesunkestävyys, säärasitusten kestävyys ja likaantumisen vaikutus ominaisuuksiin. Näiden testien tarkoituksena ei ollut todistaa aukottomasti selektiivilasin toimivuutta erillislasina, vaan tarkastella yleisimpien rasitusten vaikutusta. Mikäli selektiivilasi ei näitä kestäisi, sen käyttö erillislasina on riskialtista.

3.4.1 Selektiivilasin pesunkestävyys

Kokeessa tutkittiin hankauksen ja pesuaineen vaikutusta selektiivilasin emissiviteettiin. Kokeeseen valittiin kaksi K-lasia, joista toista pestiin astianpesuaineen ja veden liuksella ja toista lasinpesusuihkeella. Ennen koetta molemmat lasit puhdistettiin huolellisesti astianpesuaineen ja veden liuksella.

Astianpesuainetta käytettäessä lasi pestiin vesiliuokseen kostutetulla pehmeällä kankaalla. Lasi huuhdottiin puhtaaseen veteen kostutetulla kankaalla ja kuivattiin pehmeällä kankaalla. Lasinpesuainetta käytettäessä pesuaine suihkutettiin suoraan lasin pintaan. Pesuaine levitettiin lasiin pehmeällä kankaalla ja lasi kuivattiin toisella pehmeällä kankaalla.

Pesu toistettiin kaikkiaan 20 kertaa ja jokaisen pesukerran välissä lasien emissiviteetti mitattiin. Laseja ei liattu pesukertojen välissä. Pesut tehtiin kahden perättäisen työpäivän aikana.



Kuva 12. Pesukertojen vaikutus selektiivilasin emissiviteettiin.

Mittaukset on tehty neljästä kohdasta jokaisesta lasista ja tulokset ilmoitettu alla olevassa kuvassa lasikohtaisina keskiarvoina. Mittarina käytettiin ruotsalaisvalmisteista Emissiometer MK II -mittaria, jonka ilmoitettu mittaustarkkuus on $\pm 0,01$ yksikköä. Mitattu emissiviteetti-arvo on aallonpituusalueen 4 - 50 μm keskimääräinen arvo.

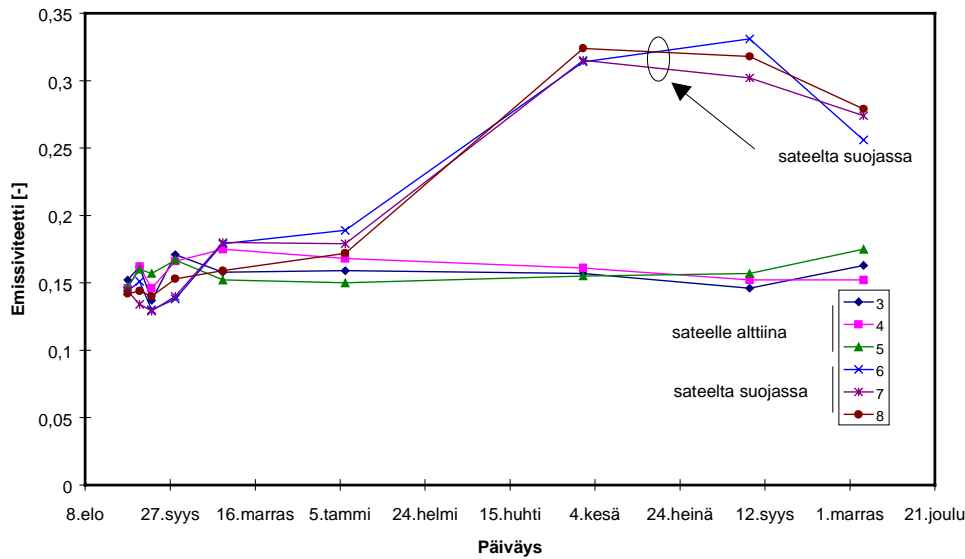
Mittaustuloksista (kuva 12) voidaan havaita, että emissiviteetti-arvot pienenevät hieman testin aikana. Tämä johtuu todennäköisesti pintojen puhdistumisesta. Pesuaineella sen sijaan ei näytä olevan vaikutusta mittaustuloksiin. Kokeen aikana ei havaittu syntyneen vaurioita lasin pintoihin.

3.4.2 Selektiivilasin sääräsitusten kestävyys

Espoon Otaniemessä sijaitsevan VTT Rakennustekniikan rakennuksen katolla olevalle terassille asennettiin 2.9.1997 kolme K-lasia siten, että sade pääsee kastelemaan selektiivipinnan ja kolme lasia sateelta suojattuun paikkaan. Lasit ovat 30°:n kulmassa pystytasoon nähden ja lasien selektiivipinnat ovat etelään päin. Laseja ei ollut suojattu auringonpaisteelta eikä tuulelta.

Lasien selektiivipinnan emissiviteetit on mitattu viidestä kohdasta jokaisesta lasista ja tuloksista on laskettu keskiarvot. Lasit on nostettu sisälle lämpiämään ja kuivumaan 3 tunniksi ennen mittausta, mutta laseja ei ole pesty ennen eikä jälkeen mittauksen. Emissiviteetit on mitattu kokeen alussa sekä epäsäännöllisin välein kokeen aikana.

Mittaukset on tehty viidestä kohdasta jokaisesta lasista ja tulokset ovat kuvassa 13 lasikohtaisina keskiarvoina. Mittarina käytettiin Emissiometer MK II -mittaria.



Kuva 13. Säärasitusten vaikutus selektiivilasien emissiviteettiin.

Mittaustuloksista voidaan päätellä, että pinnalle kertyvä pöly ja epäpuhtaus vaikuttavat emissiviteettiin (kuva 13). Sateelle alttiina olevat lasit puhdistuivat ainakin osittain sateiden aikana. Keväällä 1998 suojassa olleiden lasien emissiviteettien kasvu johtui ainakin osittain lasien pinnalle kertyneestä paksusta siitepölykerroksesta. Laseissa ei havaittu silmämääräisessä tarkastelussa näkyviä vaurioita.

Kokeen perusteella voidaan päätellä, että ilmassa olevat epäpuhtaudet ja sadevesi eivät vaurioita kovapinnoitettua selektiivilasia ainakaan kovin nopeasti. Runsaan vuoden kestäneen kokeen aikana sadeveden puhdistamien lasien emissiviteettien mitatut muutokset olivat vähäisiä eikä niiden perusteella voi päätellä mahdollisesta selektiivipinnan turmeltumisesta.

3.4.3 Selektiivilasin likaantumisen vaikutus ominaisuuksiin

Lasin selektiivipinta liattiin pitämällä lasia kynttilän liekin yläpuolella, jolloin lasin pintaan muodostui nokikerros. Koe tehtiin neljällä lasilla ja emissiviteetit mitattiin ennen koetta, eri paksuisista nokikerroksista sekä kokeen jälkeen pesytystä laseista. Mittarina käytettiin Emissiometer MK II -mittaria. Mittaustulokset on esitetty neljän mittauksen keskiarvona taulukossa 2.

Taulukko 2. Eri asteisesti kynttilän liekillä noettujen K-lasien emissiviteetti.

Likaisuusaste	Emissiviteetti (-)
Ennen koetta	0,16
Lievästi noettu	0,18
Havaittavasti noettu	0,27
Nokinen	0,50
Paksun noen peitossa	0,60
Uudelleen puhdistettu	0,16

Taulukossa oleva “havaittavasti noettu” oli niin likainen, että ikkuna olisi pesty paljon aikaisemmin ennen kuin se olisi tullut niin likaiseksi. Tällä perusteella selektiivilasi näyttää toimivan kohtuullisen hyvin lievästi likaisenakin. Arviointeja tehdessä tulee kuitenkin muistaa, että noki on keinotekoista likaa eikä siinä ole kaikkia normaalissa liassa olevia komponentteja.

3.4.4 Yhteenveto selektiivilasin rasiustenkestävyydestä

Tehdyissä kokeissa ei tullut ilmi sellaisia tekijöitä, jotka estäisivät kovapinnoitteen selektiivilasin käytön erillislasina. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että kokeiden perusteella on pääteltävissä selektiivilasia voitavan käyttää erillislasina. Kokeet olivat sangen suppeita eikä niissä otettu kaikkia normaalikäytössä esiintyviä rasituksia huomioon.

Parhaiten tämän tyyppinen lasi toimii erillislasina kuvassa 1 esitetyn MSK-ikkunan sisäpuitteessa siten, että pinnoite on keskimmäiseen lasiin päin. Tämän tyyppisessä ratkaisussa keskimäinen puite ja lasi suojaavat selektiivilasia rasituksilta ja likaantumiselta.

4 TÄYTEKAASUT

Eristyslaseissa käytetään täytekaasuna suurimolekyylisiä jalokaasuja (argon, krypton ja ksenon), koska ne johtavat ja kuljettavat lämpöä huonommin kuin ilma. Tämän seurauksena ne parantavat ikkunan lämmöneristävyyttä. Suurin hyöty kaasuista saadaan ikkunoissa, joiden eristyslasissa on selektiivilaseja. Jalokaasut ovat ilmassa esiintyviä kaasuja. Taulukossa 3 on esitetty ilman sisältämät kaasut, niiden pitoisuudet ilmassa ja tärkeimmät fysikaaliset ominaisuudet. Taulukosta voidaan havaita, että täytekaasuna käytettävien jalokaasujen lämmönjohtavuus ja ominaislämpö ovat ilman arvoa pienempiä ja viskositeetti ilman arvoa suurempi.

Taulukko 3. Ilman sisältämät kaasut ja niiden ominaisuudet /5, 7/.

Kaasu	Sym-boli	Tiheys [kg/m ³]	Molekyylipaino [kg/kmol]	Pitoisuus [tilavuusprosenttia]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Ominaislämpö [J/gK]	Viskositeetti [μPa s]
Typpi	N ₂	1,2506	28,013	78,084	0,0260	1,043	17,9
Happi	O ₂	1,429	31,999	20,946	0,0263	0,917	20,8
Hiilidioksidi	CO ₂	1,965	44,010	0,033	0,0168	0,843	15,0
Argon	Ar	1,7837	39,948	0,934	0,0179	0,896	22,9
Neon	Ne	0,8999	20,183	0,001818	0,0498	1,030	32,1
Helium	He	0,1787	4,0026	0,000524	0,1567	5,192	20,0
Krypton	Kr	3,733	83,80	0,000114	0,0095	0,247	25,6
Ksenon	Xe	5,887	131,30	0,000087	0,0055	0,158	23,2
Vety	H ₂	0,08988	2,0159	0,00005	0,1869	14,277	9,0
Metaani	CH ₄	0,716	16,043	0,0002	0,0341	2,218	11,2
Typpioksiduuli	N ₂ O	1,965	44,0128	0,00005	0,0174	0,874	15,0
Ilma keskim.		1,22	28,964		0,0262	1,007	18,6

Eristyslaseissa käytetään joskus myös rikkiheksafluoridia (SF₆), mikäli on tarvetta parantaa ääneneristävyyttä. Tämä kaasu huonontaa kuitenkin ikkunan lämmöneristävyyttä ilmatäytteiseen lasiin verrattuna, minkä vuoksi saatetaan käyttää argonin ja rikkiheksafluoridin seosta.

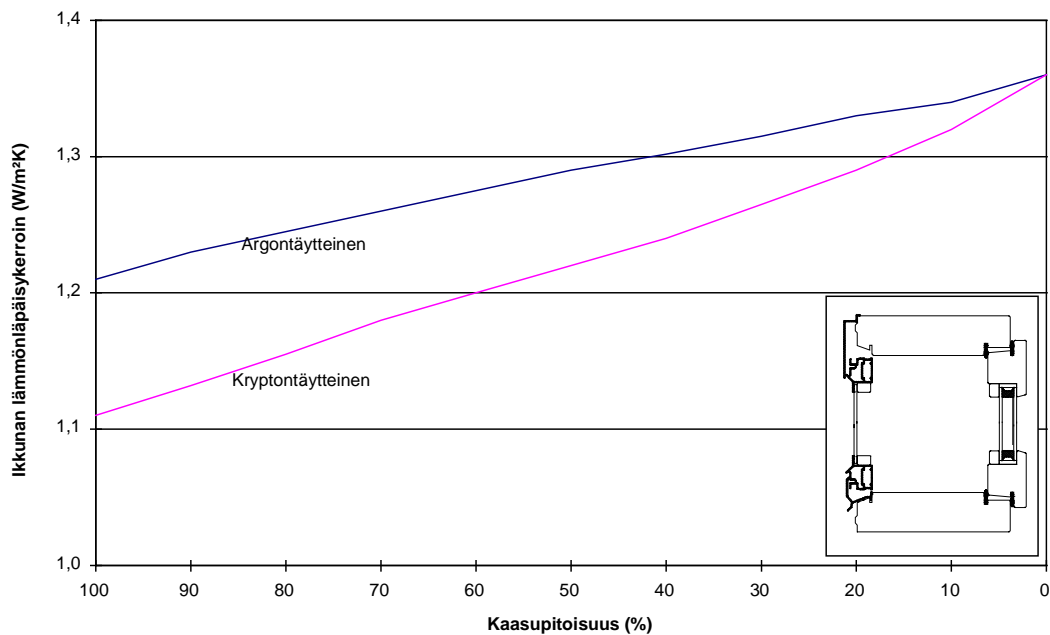
Täytekaasujen käyttöön liittyy nykyisin jonkin verran ongelmia, joista suurin on se, että kaasun tyyppiä ja määrää ei pystytä mittaamaan lasin läpi, vaan mittaus vaatii näytteenoton kaasusta. Tämän seurauksena eristyslasivalmistajat eivät ole pystyneet luomaan riittävän kattavaa laadunvalvontaa kaasutäytteisille eristyslaseille. Laadunvalvonnan puuttuminen ja se, ettei ostaja voi varmistua kaasun tyyppistä ja määrästä, aiheuttavat ostajien keskuudessa epäluottamusta kaasutäyttöä kohtaan.

Muita ongelmia ovat muun muassa kaasun hidas vuotaminen eristyslasin reunatiivistyksen läpi, määräysten puute vaadittavasta täyttöasteesta, automaattisten kaasutäyttölaitteiden kallis hankintahinta, käsintäyttölaitteiden hidas täyttönopeus ja epävarmuus täytön onnistumisesta.

4.1 ERISTYSLASIN TÄYTEKAASUJEN VAIKUTUS IKKUNASSA

Eristyslasin jalokaasulla täyttämisen tarkoituksena on parantaa ikkunan lämmön-eristävyyttä. Hyöty on sitä suurempi mitä suurempimolekyylisempää jalokaasua käytetään. Toisaalta mitä suurempimolekyylinen kaasu on, sitä harvinaisempaa ja kalliimpaa se on. Jalokaasuista argonia käytetään pääsääntöisesti, kryptonია käytetään jonkin verran, ksenonin käyttö ei kalliin hinnan vuoksi ole järkevää ja radon ei radioaktiivisuutensa takia ole mahdollinen.

Täytekaasun pitoisuuden vaikutus on lähes suoraviivaista 100-prosenttisen täytön ja pelkän ilman välillä (kuva 14). Eristyslasin täyttäminen niin, että kaasutilassa olisi puhdasta argonia tai kryptonია, on käytössä olevilla täyttömenetelmillä mahdotonta, sillä sinne jää ainakin muutama prosentti ilmaa. Mikäli täyttö jostain syystä epäonnistuu, ilmaa voi olla useita kymmeniä prosentteja. Eristyslasi myös vuotaa koko ajan täytekaasua pois reunatiivistysten läpi. Vuodon suuruus riippuu tiivistemassojen läpäisevyydestä, massauksessa olevista vioista sekä massasauman paksuudesta ja leveydestä. Jos eristyslasissa on valmistuksen jälkeen 90 % täytekaasua ja vuoto on 1 % vuodessa, 20 vuoden kuluttua eristyslasissa on täytekaasua 74 %. Tällöin kryptontäytteisen ikkunan lämmönläpäisykerroin kasvaa noin 0,03 W/m²K (kuva 14).



Kuva 14. Eristyslasin kaasun täyttöasteen vaikutus alumiinisella ulkopuitteella varustetun 1,2 m * 1,2 m -kokoisen MSE-ikkunan keskimääräiseen lämmönläpäisykerroimeen. Ikkunassa on yksi selektiivilasi.

4.2 TÄYTEKAASUN PYSYVYYS ERISTYSLASISSA

Eristyslasin kestävyys vaikuttaa pääasiassa reunatiivistys. Kestävyyden kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat:

- tiivistemassojen tarttuvuus lasiin ja välilistan materiaaliin
- tiivistemassojen elastisuus ja lujuus
- tiivistemassojen vanheneminen
- kuivikeaineen määrä
- tiivistemassakerrosten leveys ja paksuus
- diffuusionopeus tiivistemassojen läpi
- diffuusionopeus välilistan läpi

Nykyisessä kaksivaihetiivistyksessä diffuusiotiiviyys saadaan aikaan metallisen välilistan ja lasin välissä olevalla plastisella tiivistemassalla, joka lähes poikkeuksetta on polyisobutyylia (PIB). Tämän tiivistesauman leveys on muutamia kymmenesosamillimetrejä ja korkeus 3 ... 5 mm. Hyvä diffuusiotiiviyys saavutetaan sauman kapeuden ja massan huonon läpäisevyyden ansiosta. Lasin reunassa oleva elastinen massa on usein polysulfidia, mutta myös silikoni- ja polyuretaanimassoja käytetään. Tämän massan tehtävänä on pitää elementti koossa, antaa lisää diffuusiotiiviyttä ja mahdollistaa lämpötila- ja painevaihteluista aiheutuvat liikkeet. Välilistan sisällä oleva kuivike estää tiivistemassojen läpi diffusoituvan kosteuden tiivistymisen eristyslasin sisälle.

Eristyslasin toimivuuteen vaikuttaa toisaalta ympäröivän ilman sisältämien kaasujen, erityisesti vesihöyryn, diffuusiointi reunatiivistyksen läpi lasien väliseen tilaan ja toisaalta täytekaasun diffuusiointi lasien välistä reunatiivistyksen läpi ympäröivään ilmaan. Näiden diffuusioprosessien aiheuttajina on lasien välisen tilan ja ympäröivän ilman välillä olevat kaasujen pitoisuuserot, jotka pyrkivät tasoittumaan.

Artikkelissa /10/ on esitetty kymmenelle tiivistemassalle mitatut vesihöyryn diffuusionopeudet 20 ... 80 °C:n lämpötiloissa. Näistä kuuden lämpötilariippuvuus on esitetty kuvassa 15. Mittaustuloksista on havaittavissa, että lämpötilan nousu 20 °C:sta 60 °C:seen kasvattaa diffuusionopeuden 5 ... 9 kertaiseksi. Koska lämpötila vaikuttaa näin voimakkaasti diffuusionopeuteen, eristyslasin kestoajan laskennallinen arviointi edellyttää mittausten tekemistä ikkunoissa olevien tiivistemassojen todellisista lämpötiloista. Näistä lämpötiloista lasketaan vuotuinen eri lämpötilojen pysyvyysaika esimerkiksi 10 °C:n välein, minkä jälkeen laskennallisesti voidaan arvioida vuotuisen diffuusion suuruus.

Lämpötilan vaikutusta kaasujen diffuusionopeuteen voidaan kuvata Arrheniuksen yhtälön avulla:

$$\frac{P(T_1)}{P(T_2)} = e^{\left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right)} \quad (4)$$

missä

T_1 = Lämpötila 1 (K)

T_2 = Lämpötila 2 (K)

$P(T_1)$ = Diffuusionopeus lämpötilassa 1

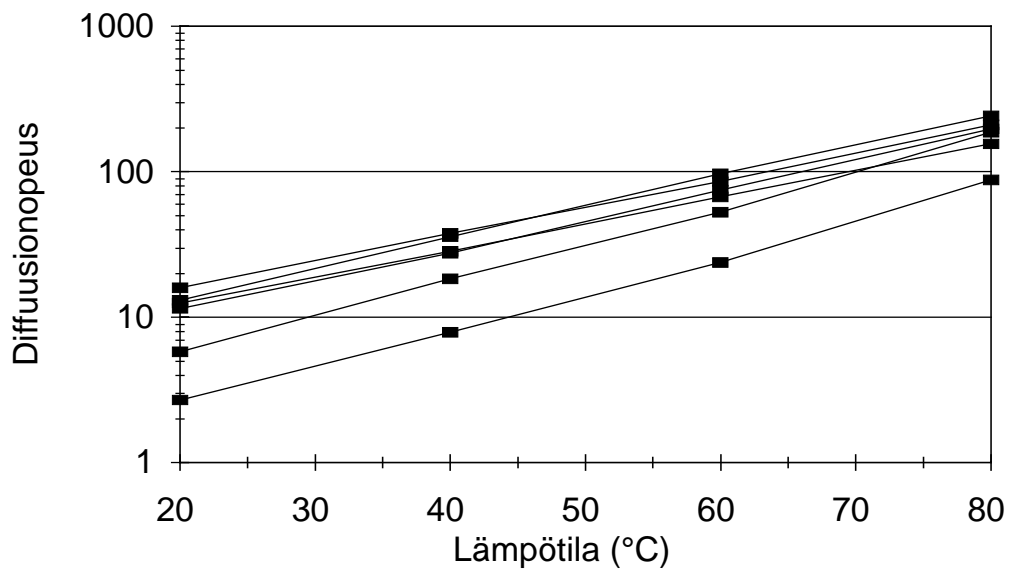
$P(T_2)$ = Diffuusionopeus lämpötilassa 2

R = ideaalikaasun vakio ($8,3145 \text{ Pa m}^3/(\text{K mol})$)

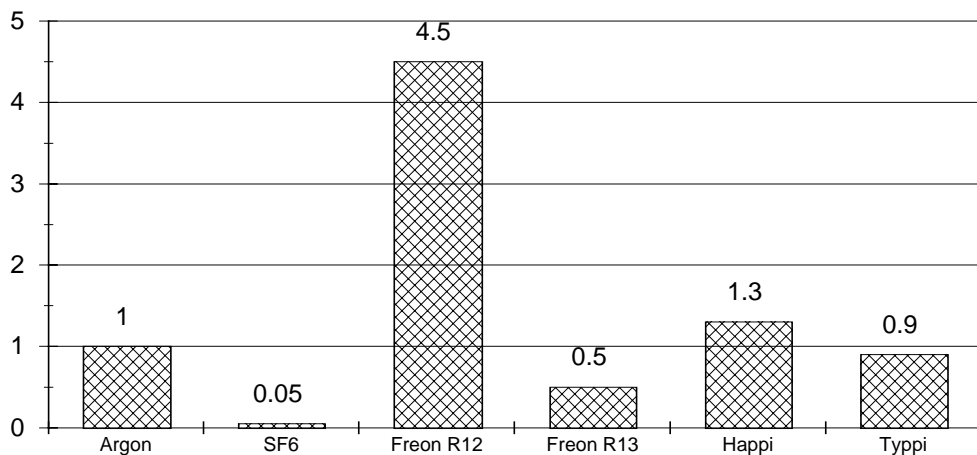
E_a = diffuusion aktivointienergia (J/mol)

e = luonnonlogaritmin kantaluku (2,71828...)

Kaavassa diffuusion aktivointienergia E_a määritetään kahdessa tai useammassa eri lämpötilassa tehtyjen diffuusiomittausten perusteella. Tämän vakion arvo riippuu kaasusta ja tiivistemassasta sekä massan paksuudesta. Kaavan avulla voidaan arvioida diffuusionopeus niissä lämpötiloissa, joissa sitä ei ole mitattu.

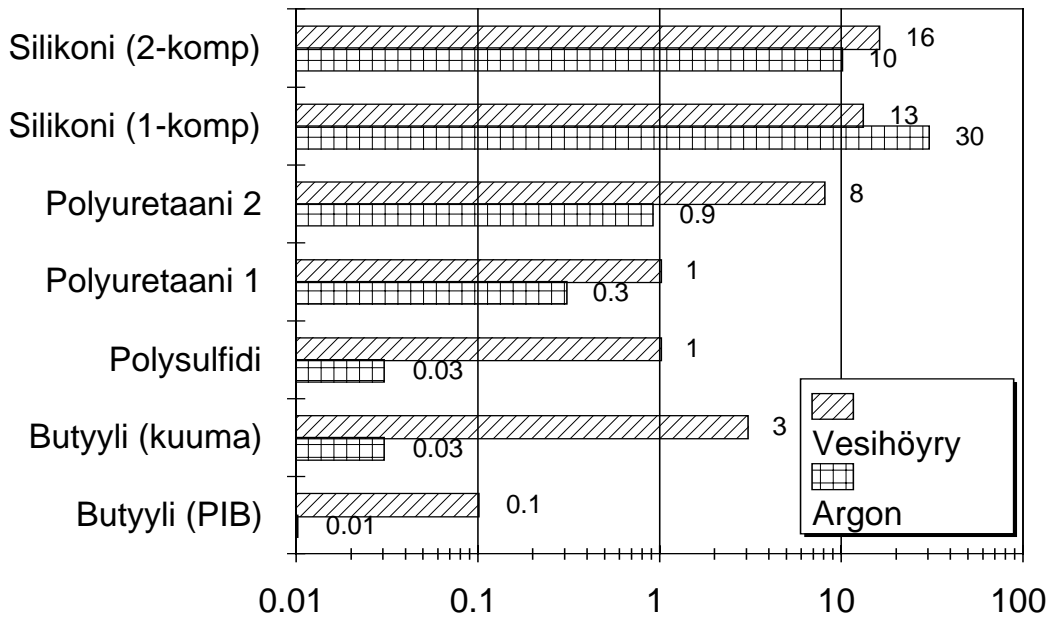


Kuva 15. Lämpötilan vaikutus eräiden tiivistemassojen läpi tapahtuvaan vesihöyryn diffuusion.



Kuva 16. Eri kaasujen suhteelliset diffuusionopeudet polysulfidimassan läpi /9/.

Lämpötilan lisäksi diffuusionopeuteen vaikuttavat kaasun molekyylikoko, tiivistemassan materiaali, tiivistettävän raon leveys ja tiivistemassan paksuus. Kuvassa 16 on esitetty eri kaasujen suhteelliset diffuusionopeudet polysulfidimassan läpi. Saumausmassojen vanheneminen liuottimien ja pehmittimien haihtumisen, hapettumisen ja UV-säteilyn vuoksi vaikuttaa myös osaltaan kaasujen diffuusionopeuteen. Tiivistemassojen käyttöolosuhteissa tapahtuvan vanhenemisen ja sen vaikutuksen arviointi diffuusionopeuteen on yleensä hankalaa.



Kuva 17. Argonin ja vesihöyryn suhteelliset diffuusionopeudet eri tiivistemassojen läpi /9, 11/.

Artikkeleissa /3, 6, 9, 10 ja 11/ on esitetty mittaustuloksia vanhennuskokeista. Kokeet on tehty joko nopeutettuina tai normaalilla nopeudella kahden vuoden aikana. Tuloksista (kuva 17) käy ilmi, että kaksivaihettiivistus toteutettuna PIB- ja polysulfidimassalla on diffuusiotiiviyden kannalta paras. Tällöin täytekaasuna olevan argonin määrä alenee 0,4 - 2 % vuodessa. Muilla ratkaisuilla alenema voi olla useita prosentteja. Tuloksia arvioitaessa tulee kuitenkin muistaa, että eri valmistajien massoilla diffuusiotiiviydet voivat olla hyvinkin erilaisia.

Eurooppalaisessa eristyslasien täytekaasujen vuotonopeuden mittaustandardissa /12/ on esitetty vaatimus, että vuotomäärän tulee olla testiolosuhteissa alle 1 % vuodessa. Standardin liitteessä B on arvioitu mitattujen vuotonopeuksien suhdetta rakennuksen ikkunoiden vuotonopeuteen. Siinä todetaan, että 10 vuotta rakennuksen seinässä olleiden ikkunoiden eristyslasien täytekaasujen vuoto-nopeus oli vertailumittauksissa noin 1/10 laboratoriomittausten arvosta.

Arvioitaessa täytekaasun pitoisuuden muutosta ikkunan käyttöaikana tulee muistaa, että diffuusio hidastuu pitoisuuden pienentyessä ja että saumausmassojen vanheneminen vaikuttaa myös diffuusionopeuteen. Tämän vuoksi pitoisuutta tietyn ajan kuluttua ei voi laskea suoraan kertomalla diffuusionopeutta ajalla ja vähentämällä tulos alkupitoisuudesta.

4.3 TÄYTEKAASUN FYSIKAALISET TOTEAMISMENETELMÄT

Fysikaalisessa menetelmässä kaasun tunnistaminen perustuu kaasun jonkin sellaisen fysikaalisen ominaisuuden määrittämiseen, joka on yksilöllinen eri kaasuilla. Menetelmällä ei yleensä voi tunnistaa eri kaasuja, vaan määrittää kaasuseoksen jonkin ominaisuuden, johon argon tai krypton vaikuttaa. Näitä ominaisuuksia ovat: kaasujen lämmönjohtavuus, viskositeetti, äänennopeus kaasussa, molekyyli-paino, molekyylin koko, läpilyöntilujuus, säteilyn absorptio, plasman emittoima säteily. Fysikaalisella menetelmällä voidaan kuitenkin määrittää tunnettujen kaasujen seoksen kaasujen pitoisuudet mitattavan suureen, esimerkiksi äänen nopeuden, perusteella.

4.3.1 UV- tai IR-säteilyn absorptio

Kaasut absorboivat sähkömagneettista säteilyä. Absorptiospektri on riippuvainen kaasun tyypistä ja absorboituneen säteilyn määrä riippuu kyseisen kaasun pitoisuudesta kaasuseoksessa. Monet kaasut absorboivat infrapunasäteilyn jotain aallonpituutta. Tätä menetelmää käytetään esimerkiksi ilman hiilidioksidipitoisuuden määrittämisessä ja joissain palohälyttimissä.

Eristyslasin täytekaasun tunnistuksessa tämän menetelmän haittana on se, että säteily joutuu läpäisemään kaasun lisäksi vähintään kaksi lasikerrosta. Lasi läpäisee niitä aallonpituusalueita huonosti, jotka ovat merkityksellisiä kaasujen tunnistuksessa. Tämän vuoksi menetelmä soveltuu huonosti eristyslasien kaasuntunnistamiseen.

4.3.2 Radioaktiivisen säteilyn absorptio

Radioaktiivisen säteilyn absorptiota käytetään muun muassa palokaasujen tunnistamiseen palohälyttimissä. Niissä on pieni määrä radioaktiivista ainetta, joka tuottaa α -säteilyä. Tästä ei ole kuitenkaan ihmisille haittaa, koska α -säteily ei ole kovin läpikulkevaa ja hälyttimet ovat katossa poissa ihmisten ulottuvilta.

Lasi absorboi α -säteilyä, minkä vuoksi sitä ei voi käyttää kaasujen tunnistukseen. β - ja γ -säteilyt ovat niin läpikulkevia, että niitä ei voi käyttää turvallisesti kädessä pidettävissä mittareissa.

4.3.3 Ionisoidun kaasun emittoiman säteilyn spektri

Mikäli täytekaasun atomit saadaan viritettyä siten, että ne säteilevät valoa tai muuta ikkunalasin läpäisevää säteilyä, täytekaasun kaikki komponentit voidaan tunnistaa säteilyn spektrin avulla. Menetelmä on luotettava, sillä jokaisella kaasulla on sille tyypillinen spektrinsä. Kaasun määrä vaikuttaa säteilyn voimakkuuteen, minkä perusteella pystytään määrittämään kaasupitoisuus.

Kaasujen viritys voidaan saada aikaan korkean jännitteen avulla. Tätä menetelmää sovelletaan esimerkiksi salamalaitteiden välähdysoputkissa, jossa matalapaineista ksenonkaasua viritetään sähkökentän avulla. Eristyslasissa kaasun paine on sama kuin ympäröivässä ilmassa, minkä vuoksi purkauksen aiheuttavan sähkökentän on

oltava suurempi. Lisäksi lasien hyvä eristävyys nostaa tarvittavaa jännitettä. Menetelmä on käyttökelpoinen, mikäli kaasuatomit saadaan viritettyä turvallisesti ja eristyslasiä vaurioittamatta.

Menetelmän etuna on, että lasien paksuudella eikä lasien välisellä etäisyydellä ole vaikutusta mittaustulokseen, jos purkaus saadaan syntymään. Lisäksi menetelmä on yksikäsitteinen, sillä jokaisella kaasulla on sille ominainen spektrinsä. Tämän vuoksi tunnistus on varma eikä menetelmää ole mahdollista pettää jollain erikoisella kaasuseoksella.

Tähän menetelmään perustuen Helsingin Yliopiston kemian laitoksen fysikaalisen kemian laboratorio on hakenut patenttia eristyslasiä kaasun tyyppin ja pitoisuuden määrittävästä mittaamenetelmästä. Menetelmän kehittäminen jatkuu ja kaupallisia tuotteita on odotettavissa vuoden 2000 alkupuolella.

4.3.4 Muutokset dielektrisyysvakiossa

Aineen dielektrisyysvakio vaikuttaa virran kulkuun aineen läpi, kun aineen yli vaikuttaa muuttuva sähkökenttä. Tätä vakiota mitataan esimerkiksi asettamalla aineen pinnalle tai aineeseen kondensaattorilevyt ja mittaamalla näiden levyjen välistä sähkövirtaa vaihtojännitteen avulla. Tämän tyyppisiä mittareita käytetään kosteuden toteamiseen ja kosteuspitoisuuden mittaamiseen rakennusaineista ja rakenteista.

Käsikirjassa /5/ on esitetty dielektrisyysvakioita sekä nesteille että kaasuille. Ilmalle siinä on arvo 1,00059 ja argonille 1,000545. Näiden arvojen erot ovat hyvin pienet ja niiden mittaaminen ikkunalasin lävitse on käytännössä mahdotonta, koska lasin dielektrisyysvakio on 3 - 7. Dielektrisyysvakion muutokset pystyttäisiin mittaamaan, jos eristyslasiä kaasutilaan asennettaisiin valmistuksen yhteydessä elektrodit.

Menetelmä soveltuu hyvin kosteuspitoisuuden mittaamiseen huokoisista materiaaleista, koska veden dielektrisyysvakio on 78,54 ja esimerkiksi puun on 3 - 4.

4.3.5 Muutos läpilyöntijännitteessä

Sähköpurkauksen syntymiseen kaasuvälissä vaikuttaa kaasun tyyppi, paine, lämpötila, mahdollinen ionisoiva säteily (esimerkiksi UV-säteily) ja kaasussa seosaineena oleva kosteus. Myös elektrodien muodolla ja koolla on vaikutusta läpilyöntijännitteeseen. Tämä on havaittavissa helposti esimerkiksi ukonilmalla, jolloin salama purkautuu helpommin teräväkärkisiin mastoihin kuin isoihin rakenteisiin, esimerkiksi taloihin.

Taulukkokirjassa /14/ on esitetty arvot ilman, lasin ja muiden eristeaineiden läpilyöntilujuudelle. Kun jännitekentän voimakkuus ylittää edellä mainitun arvon, syntyy sähköpurkaus (läpilyönti), joka näkyy kaasumaisessa aineessa valokaarena, jos kaasun paine on lähellä normaalin ilmakehän painetta.

Kirjassa on esitetty ilman läpilyöntilujuudelle arvo 3 kV/mm ja lasin arvoksi 16 kV/mm. Tästä voidaan laskea karkeasti 2k4-12 eristyslasiä läpilyöntijännitteeksi:

$$4 * 16 + 12 * 3 + 4 * 16 \text{ kV} = 164 \text{ kV}$$

Tämän suuruusluokan jännite on henkilöturvallisuuden kannalta vaarallinen eikä varmaankaan tule kyseeseen. Toinen ongelma on, että elektrodit tulee saada lasin eri pinnoille, mikä saattaa olla hankalaa rakennuksiin asennetuissa kiinteissä ikkunoissa ja lasituksissa.

Menetelmässä on myös ongelmana, että lasien paksuus ja lasien välinen etäisyys vaikuttavat merkittävästi läpilyöntijännitteeseen, minkä vuoksi nämä mitat tulee pystyä mittaamaan kohtalaisella tarkkuudella. Esimerkiksi 0,1 mm:n muutos toisen lasin paksuudessa muuttaa läpilyöntijännitettä 1,6 kV.

4.3.6 Muutos äänennopeudessa

Äänennopeus kaasussa riippuu kaasun molekyylipainosta, lämpötilasta ja ominaislämmöstä. Tekniikan käsikirjassa on esitetty äänennopeuden c ja näiden tekijöiden väliseksi riippuvuudeksi kaavat /7 ja 8/:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot RT / M} \quad (5)$$

$$\gamma = C_p / C_v \quad (6)$$

Kaavoissa γ on kaasukohtainen adiabaattivakio, T on lämpötila (K) ja M on moolimassa (kg/kmol). C_p on kaasun ominaislämpö vakiopaineessa ja C_v on kaasun ominaislämpö vakiotilavuudessa. R on kaasuvakio (8314,51 J/kmol K).

Ilman adiabaattivakioksi käsikirja /7/ antaa arvon 1,4. Yksiatomisten jalokaasumolekyyliden adiabaattivakio on käsikirjan /8/ mukaan 2,5/1,5 (=1,667). Kaavat 5 ja 6 on tarkoitettu puhtaille kaasuille. Kahden kaasun seokselle, jossa kaasujen suhteelliset osuudet ovat x_1 ja x_2 , on esitetty konferenssijulkaisussa /4/ seuraavat kaavat:

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (7)$$

$$M = x_1 M_1 + x_2 M_2 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\gamma - 1} = \frac{x_1}{\gamma_1 - 1} + \frac{x_2}{\gamma_2 - 1} \quad (9)$$

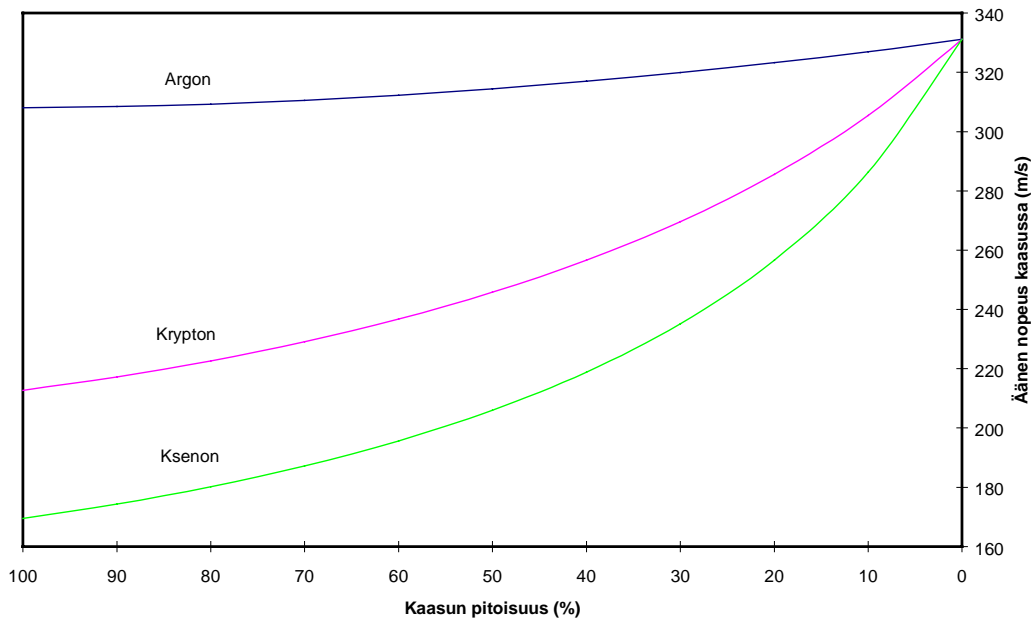
$$c = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{x_1}{\gamma_1 - 1} + \frac{1 - x_1}{\gamma_2 - 1}} + 1 \right) \left(\frac{RT}{x_1 M_1 + (1 - x_1) M_2} \right)} \quad (10)$$

Taulukko 4. Kaasun ja lämpötilan vaikutus äänennopeuteen puhtaassa kaasussa.

Kaasu	Lämpötila			
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C
Ilma	331,3	337,3	343,2	349,0
Argon	307,7	313,3	318,8	324,2
Krypton	212,5	216,3	220,1	223,8
Ksenon	169,7	172,8	175,9	178,8

Taulukossa 4 on esitetty äänen nopeudet eräissä jalokaasuissa lämpötilavälillä 0 ... 30 °C. Arvoista voidaan päätellä, että krypton ja ksenon on helpohko tunnistaa, koska äänennopeus niissä on merkittävästi pienempi kuin muissa kaasuisissa. Sitä vastoin äänen nopeuden erot argonissa ja ilmassa ovat alle 8 %. Jotta näin pieni ero pystyttäisiin mittaamaan, lasien välinen etäisyys tulee tietää hyvin tarkasti. Esimerkiksi 1 mm:n virhe lasien välisessä etäisyydessä aiheuttaa samaa luokkaa olevan aikaviiveen kuin kaasun muuttaminen ilmasta argoniksi. Kaasun lämpötila tulee olla myös tiedossa, jotta kaasupitoisuus voitaisiin arvioida mahdollisimman tarkasti.

Kuvassa 18 on laskettu kaavan 6 avulla äänen nopeus jalokaasun ja ilman seoksessa. Tarkasteltuja jalokaasuja olivat argon, krypton ja ksenon. Kuvasta voidaan havaita, että äänennopeuden ja pitoisuuden välinen riippuvuus ei ole lineaarinen.



Kuva 18. Kaasun ja kaasupitoisuuden vaikutus äänen nopeuteen jalokaasun ja ilman seoksessa, kun kaasun lämpötila on 0 °C.

Mittaaminen on mahdollista esimerkiksi ultraäänin avulla. Lasin pintaan johdetaan ultraäänipulssi ja äänen kulkunopeus lasketaan äänipulssin ja kaasuvälin toisesta pinnasta takaisin heijastuneen pulssin aikavälimittauksen perusteella. Mene-

telmän ongelmana on äänen huono siirtyminen lasista täytekaasuun ja täytekaasusta takaisin lasiin. Näissä rajapinnoissa tapahtuu äänen voimakas vaimeneminen, minkä vuoksi mitattavien pulssien erottaminen muista heijastuksista voi olla vaikeaa.

Menetelmä ei ole aukoton, sillä myös muilla kaasuilla voi olla saman suuruisia äänennopeuksia. Menetelmä ei tunnista kaasua suoraan, vaan se mittaa kaasun fysikaalista ominaisuutta. Tämän vuoksi menetelmä ei pysty luotettavasti toteamaan, onko lasin sisällä lähes puhdasta argonia vai onko siellä ilmaa, jossa on jonkin verran kryptonaa.

Saksalaiset tutkijat ovat tutkineet ultraäänen kulkunopeuden mittaamiseen perustuvaa menetelmää [4]. Koejärjestelyssä mitattiin 1 MHz:n ultraäänen kulku-aika eristyslaselementin läpi. Ultraäänen lähetin ja vastaanotin sijaitsivat vastakkaisilla puolilla eristyslasiä.

Mittausjärjestelyssä tutkijat kokivat ongelmaksi lasin ja kaasun erilaiset impedanssit, minkä vuoksi läpi tulevan signaalin taso on vain $2,2 \cdot 10^{-8}$ alkuperäisen signaalin tasosta. Toinen tarkkuuteen vaikuttava tekijä on argonin ja ilman lähes samat äänennopeudet, mikä asettaa suuret tarkkuusvaatimukset eristyslaselementin paksuuden mittaustarkkuudelle.

4.3.7 Muutos ultraäänen absorptiossa

Kaasun tiheys ja viskositeetti vaikuttavat äänen kulkuun kaasussa. Tässä menetelmässä on samat ongelmat kuin äänen nopeuden mittaamisessa. Äänen siirtyminen lasista kaasuun ja päinvastoin on heikkoa, jolloin kaasussa tapahtuvan pienen absorptioon mittaaminen on vaikeaa. Mittausta vaikeuttavat myös heijastukset lasipinnoista, jotka ovat paljon voimakkaampia kuin mitattava signaali.

4.3.8 Muutos kaasun tiheydessä

Yksi tapa mitata kaasun tiheyttä on asettaa kaasutilaan indikaattoripalloja, jotka nousevat ylös, kun kaasun tiheys ylittää tietyn arvon. Indikaattoripallo on rakenteeltaan ohutseinäinen pallo, jonka sisällä on joko tyhjä tai tutkittavaa kaasua kevyempää kaasua, esimerkiksi vetyä. Tässä menetelmässä palloja tulee olla yksi jokaista tiheysarvoa (kaasupitoisuusarvoa) kohti. Toinen vaihtoehto on kiinnittää yksi indikaattoripallo kaasutilassa olevaan jousivaakaan, jolloin kaasun tiheys ja pitoisuus voidaan lukea vaa'an asteikolta.

Molemmissa menetelmissä pallon seinämän tulee olla ehdottoman diffuusiotiivis, jotta menetelmää voitaisiin käyttää koko umpiolasin kestoajan ajan. Vaihtoehtoisina tällaisina materiaaleina ovat lasi ja metallit. Näiden heikkoutena on suuri paino verrattuna niiden syrjäyttämän kaasun painoon, minkä seurauksena pallon läpimitta kasvaa haitallisen suureksi.

Menetelmän etuna on se, että eristyslasiä laadunvalvonnassa ja kunnontarkkailussa ei tarvita erillisiä mittalaitteita. Haittana on indikaattoreista aiheutuva lisähinta jokaiseen lasielementtiin.

4.3.9 Muutos kaasun lämmönjohtavuudessa

Täytekaasun tyyppi ja pitoisuus vaikuttavat eristyslasin lämmöneristävyyteen ja lämmönjohtavuuteen. Tulokseen vaikuttavat kaasun lisäksi merkittävästi myös selektiivilasin emissiviteetti ja lasien välinen etäisyys, minkä vuoksi mittari täytyy kalibroida eri selektiivilaseille ja lasiväleille.

Jos mitataan koko lasipaketin lämmönjohtavuus, lasipintojen välille tulee tehdä lämpötilaero ja mitata lämpövirta eristyslasin läpi. Lisäksi lasin lämpökapasiteetin vuoksi mittaaminen vaatii tasaantumisaikaa noin tunnin ja se tekee mittaamisesta hitaan. Edellä mainitut tekijät tekevät menetelmästä häiriöalttiin ja epäluotettavan.

4.4 TÄYTEKAASUN KEMIAALLISET TOTEAMISMENETELMÄT

Jalokaasut (argon, krypton jne.) eivät muodosta kemiallisia yhdisteitä muiden alkuaineiden kanssa kuin poikkeustapauksissa ja -olosuhteissa. Tämän vuoksi näiden kaasujen toteaminen ei ole mahdollista niiden kemiallisten reaktioiden perusteella. Täytekaasun pitoisuuden määrittäminen lasien välisessä tilassa olevien ilman kaasujen avulla on mahdollista, mutta tämä menetelmä ei tunnista itse täytekaasua, vaan lasiväliin jääneen ilman sisältämän kaasun.

On olemassa aineita, jotka muuttavat väriään ympäröivän kaasuseoksen happipitoisuuden muuttuessa. Värimuutokset ovat suhteellisen voimakkaita esimerkiksi keltaisesta siniseksi, kun hapen osuus kaasuseoksessa muuttuu $0 \Rightarrow 100\%$. Tähän menetelmään perustuen on mahdollista valmistaa lasiväliin laitettavia tarroja, jotka muuttavat väriään esimerkiksi läsnä olevan hapen vaikutuksesta.

Tämän tyyppinen menetelmä soveltuu lähinnä eristyslasin kunnon tarkkailuun. Menetelmä ei tunnista kaasuseoksen muita kaasuja millään tavalla, vaan värimuutos on sama olipa täytekaasuna argon, krypton, typpi tai jokin muu happea sisältämätön kaasuseos.

4.5 AINETTA RIKKOMATTOMIEN TUNNISTUSMENETELMIEN ARVIOINTI

Edellä esitetyt menetelmät voidaan jakaa kolmeen luokkaan, joita ovat: soveltumattomat menetelmät, vaikeasti sovellettavat menetelmät ja mahdolliset menetelmät. Mikään menetelmä ei ole sellaisenaan valmis, vaan kaikissa on joitain ongelmia, joiden voittamiseen edellytetään tutkimuspanosta. Seuraavassa on käytetty tätä luokittelua:

Soveltumattomat menetelmät

- kemialliset menetelmät
- UV- tai IR-säteilyn absorptio

Vaikeasti sovellettavat menetelmät

- radioaktiivisen säteilyn absorptio
- muutokset dielektrisyysvakiossa
- muutos kaasun tiheydessä
- muutos kaasun lämmönjohtavuudessa

Mahdolliset menetelmät

- ionisoidun kaasun emittoiman säteilyn spektri
- muutos läpilyöntijännitteessä
- muutos äänennopeudessa
- muutos ultraäänen absorptiossa

Edellä esitetyistä mahdollisista menetelmistä ionisoidun kaasun emittoiman säteilyn spektrin määrittämiseen perustuva menetelmä on ainoa, joka antaa yksikäsitteisen ja luotettavan tuloksen ainakin täytekaasun tyyppin osalta. Pitoisuuden määrittämiseen saattaa vaikuttaa lasien paksuus ja pinnoitteiden tyyppi. Näiden tekijöiden selvittäminen edellyttää laboratoriokokeita.

4.6 TÄYTEKAASUN MÄÄRITTÄMINEN NÄYTTEENOTOLLA

Kaasuseoksen komponenttien tyyppin ja määrän selvittäminen kaasuanalyysilaitteistolla lasien välistä otettavan näytteen perusteella on luotettava tapa määrittää tyyppi ja pitoisuus. Menetelmän haittana on mittauksessa tarvittavan kaasukromatografi- tai massaspektrometrilaitteiston kallis hinta, suuri koko, mittauksen hitaus ja tutkittavan lasin vaurioituminen mittauksessa. Määritykseen kaasua tarvitaan niin vähän, että sen ottaminen kaasutilasta ei vaikuta lasin ominaisuuksiin, mutta näytteenottoa varten tehtävä reikä voi vuotaa kaasua pois pitkän ajan kuluessa, vaikka reikä suljettaisiinkin esimerkiksi kitillä.

Kanadalaiset ovat kehittäneet näytteenottoon perustuvaa mittausta varten lasin välilistaan asennettavan kumitulpan, jonka läpi näyte voidaan ottaa injektioneulalla ja joka kuroutuu umpeen, kun neula vedetään pois /2/.



Kuva 19. Näytteenottoon perustuva kaasunpitoisuuden mittari (Lisec).

Eristyslasin jalokaasulla täyttämisen idea on pienentää lämmön johtumista lasin lävitse. Lämmönjohtavuuden mittaaminen kaasusta on suhteellisen nopeaa ja tätä menetelmää käytetään itävaltalaisen LISECin markkinoimassa kaasunpitoisuuden mittarissa (kuva 19). Mittarilla mitattaessa eristyslasin välilistaan tehdään reikä ja tämän kautta imetään näyte mittariin, josta tulos on luettavissa muutamassa sekunnissa. Näytekaasu voidaan palauttaa takaisin eristyslasiin mittauksen jälkeen.

Taulukossa 5 on vertailtu Lisec-mittarin tuloksia kaasukromatografilla mitattuihin. Mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, että mittarin tarkkuus riittää moniin tarkoituksiin. Mitattaessa tulee kuitenkin tietää eristyslasin kaasun tyyppi, sillä mittari ei pysty sitä tunnistamaan. Kaasun tyyppi valitaan mittarista ennen mittausta. Mittarilla ei voi mitata kuin argonin tai kryptonin tai ksenonin ja ilman seosta. Muut kaasuseokset, kuten rikkiheksafluoridin, argonin ja ilman seos antavat kyllä tuloksen, mutta sillä ei ole mitään tekemistä todellisuuden kanssa.

Taulukko 5. Mittarin tarkkuus verrattuna kaasukromatografiin.

Mittari	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 6	Näyte 7
Kaasukromatografi	86,5	88,1	0,5	41,3	83,7	87,3	99,7
Lisec-mittari	85,2	86,8	0,4	36,1	81,7	85,8	100,0

4.7 ERISTYSLASIIEN TÄYTTÄMINEN

Eristyslasin kaasutila on aluksi täynnä eristyslasitehtaan ilmaa ja se korvataan täytekaasulla joko eristyslasielementin valmistuksen yhteydessä automaattitäyttölaitteella tai jälkeempään käsintäyttölaitteella. Valmistusmenetelmästä johtuen kaasutila ei ole aivan täynnä jalokaasua, vaan siellä on aina jonkin verran ilmaa.

Suomessa ei ole vielä eristyslasin kaasutäytön täyttöasteelle vaatimustasoa. Sen sijaan joissain maissa täyttöastevaatimuksena on vähintään 90 %. Saman suuruisesta vaatimustasosta on käyty keskusteluja myös Suomessa ja on todennäköistä, että likimäärin samaa tasoa oleva vaatimus tulee voimaan myös meillä.

4.7.1 Kaasutäytön teoria

Eristyslasin kaasutilan täytekaasun pitoisuutta täyttöprosessin aikana voidaan kuvata yksinkertaisella differentiaaliyhtälöllä:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{q_v}{V}(c_x - c) \quad (11)$$

missä

c = kaasutilan konsentraatio (%)

c_x = sisään virtaavan kaasun konsentraatio (%)

q_v = kaasun tilavuusvirta (l/s)

V = kaasutilan tilavuus (l)

t = aika (s)

Kun yhtälö integroidaan ajan yli ja oletetaan alkutilanteen kaasupitoisuudeksi nolla, saadaan:

$$c = c_x (1 - e^{-\frac{q_v t}{V}}) \quad (12)$$

Ratkaisu voidaan kirjoittaa myös yleisempään muotoon:

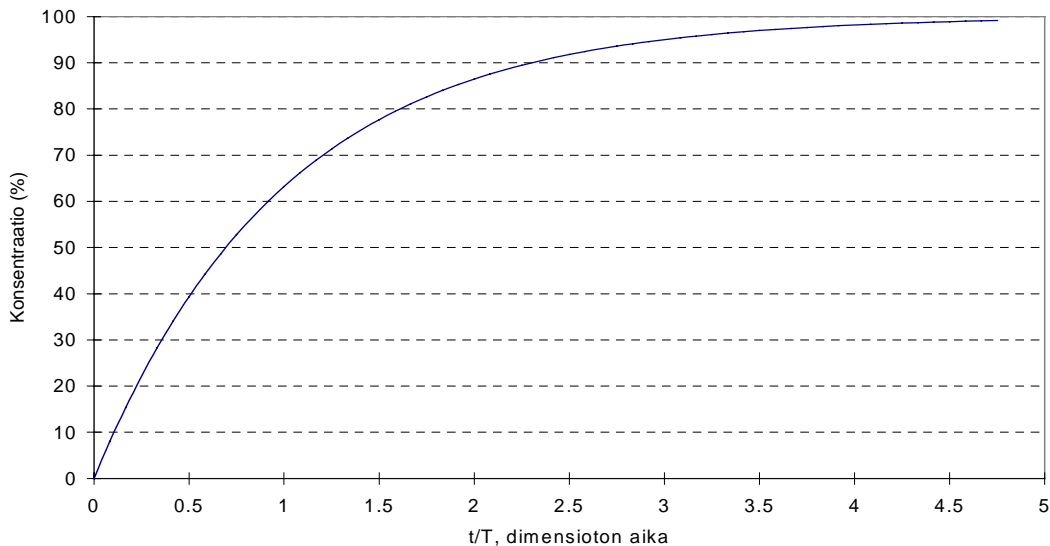
$$c = c_x (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (13)$$

missä τ on aikavakio, joka lasketaan kaavasta:

$$\tau = V / q_v \quad (14)$$

Täydellisen sekoittumisen yhden aikavakion prosessin pitoisuus ajan funktiona on esitetty kuvassa 20. Kuvasta huomataan, että 90 %:n pitoisuuden saavuttamiseen kuluva aika on noin $2,3 * \tau$. Esimerkiksi yhden neliömetrin kokoisen, 12 mm:n välilistalla varustetun eristyslasin täyttämiseen 90-prosenttisesti kuluu aikaa $2,3 * (12 \text{ l} / (6 \text{ l/min})) = 4,6 \text{ min}$, jos kaasun virtausnopeus on 6 l/min.

Käytännössä, jos kaasutäyttö tehdään lasin alareunasta pienellä virtausnopeudella ja sekoittumista ei tapahdu, kaasu virtaa lasiväliin patjamaisena kerroksena, jonka yläpinta nousee täytön edetessä ylöspäin. Tällöin ideaalitapauksessa aikavakion τ kuluttua kaasukerros on saavuttanut kaasuvälin yläosan ja elementti on täynnä. Käytännön tilanteessa kaasutäyttö on edellä kuvattujen prosessien sekoitus. Mitä pienemmällä virtausnopeudella kaasu tulee lasien väliin, sitä vähemmän se sekoittuu välissä olevaan ilmaan, mutta toisaalta sitä kauemmin yhden lasin täyttäminen kestää.

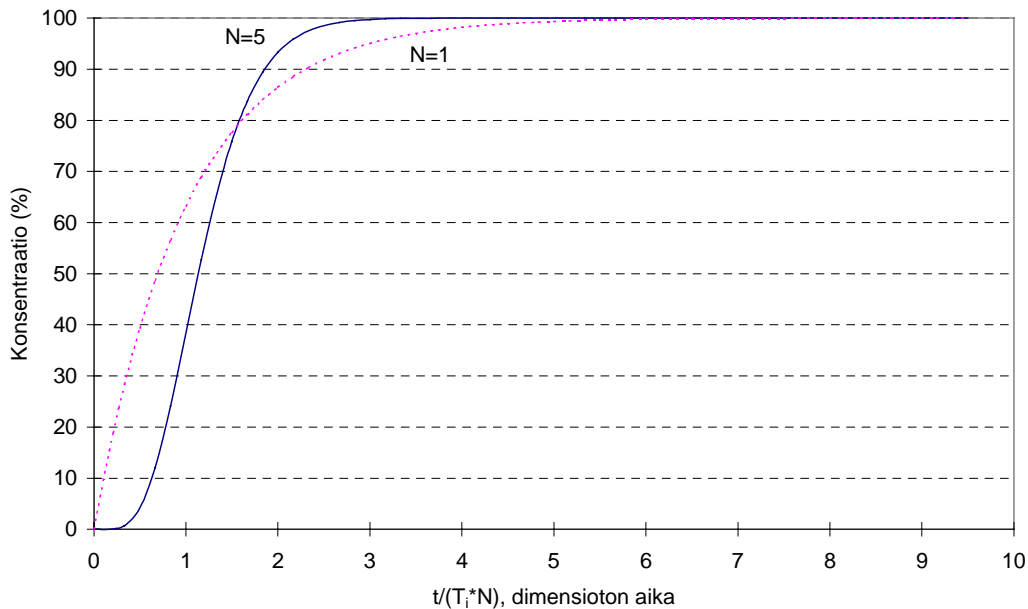


Kuva 20. Täydellisen sekoittumisen yhden aikavakion prosessin konsentraatio ajan funktiona.

Kaasutäytön pitoisuutta ulosvirtausaukon lähellä voidaan arvioida monivyöhykemallilla, jossa kaasu oletetaan täysin sekoittuneeksi kussakin vyöhykkeessä /1/. Viimeisestä elementistä N ulos virtaavan kaasun pitoisuus voidaan esittää muodossa:

$$C = C_x \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \left[1 + \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2!\tau^2} + \frac{t^3}{3!\tau^3} + \dots + \frac{t^N}{N!\tau^N} \right] \right) \quad (15)$$

Kuvassa 21 on esitetty viimeisen elementin kaasun konsentraatio ajan funktiona, kun monivyöhykemallin elementtien lukumäärä on 5. Kuvassa on esitetty vertailun vuoksi myös konsentraatio yhden elementin mallilla laskien.



Kuva 21. Monivyöhykemallin ($N=5$) viimeisen elementin täyttöaste ajan funktiona.

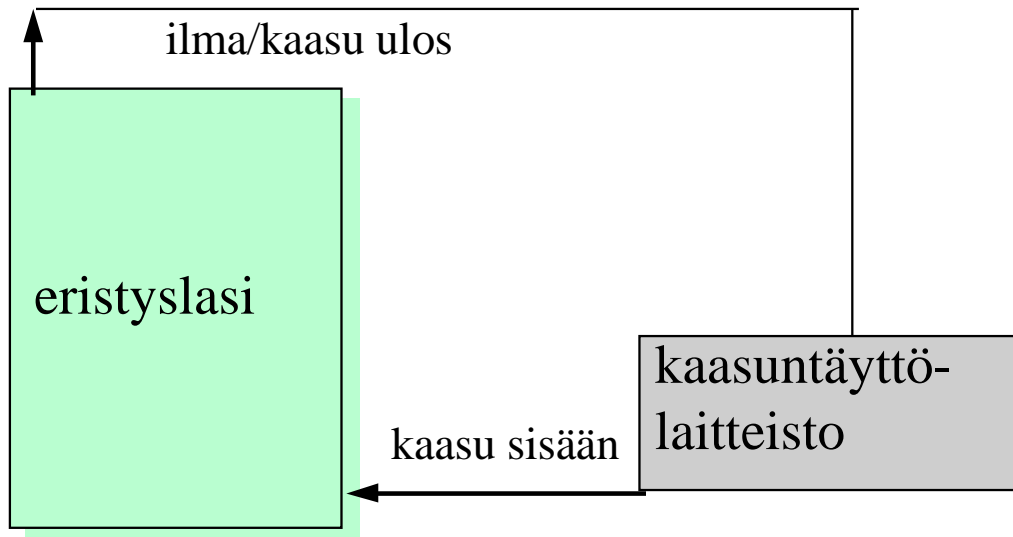
4.7.2 Kaasutäytön menetelmät

Eristyslasien kaasuntäyttö tehdään täyttölaitteistolla, joka ottaa kaasun kaasupullostasta ja johtaa sen venttiilien kautta putkea pitkin lasien väliin. Kaasu syrjäyttää eristyslasin ilman ja täyttölaitteiston mittaussanturi seuraa poistuvan kaasun happipitoisuutta ulosvirtausaukon lähellä. Kun happipitoisuus on tarpeeksi pieni, täyttö lopetetaan katkaisemalla kaasun syöttö. Toinen vaihtoehto on mitata eristyslasin koko, laskea lasien välisen tilan kaasutilavuus ja annostella tarvittava määrä kaasu eristyslasiin.

Kaasuntäyttömenetelminä ovat käsintäyttö ja automaattitäyttö. Laitteistoissa voidaan säätää kaasun virtausnopeutta, täyttö- ja ulostulokohtaa sekä kaasutäytön lopetuskriteerejä. Kaasun virtausnopeus vaikuttaa kaasun turbulenssiin ja sekoit-

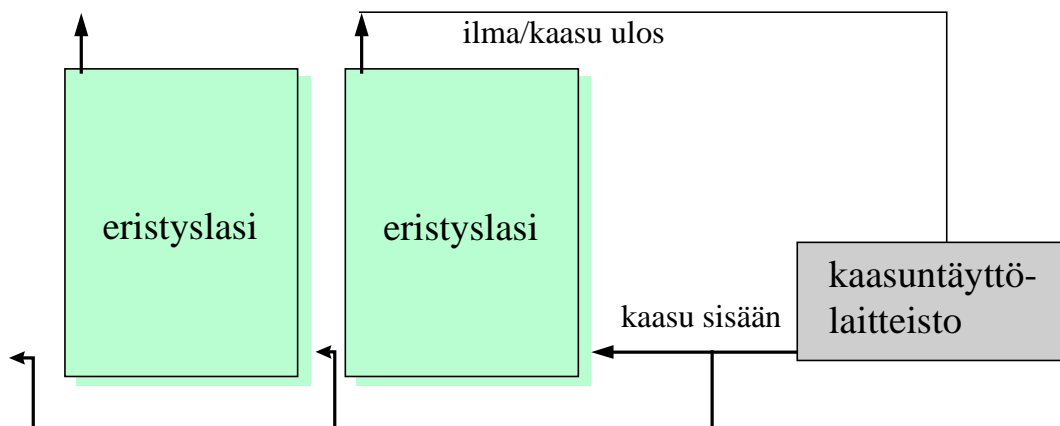
tumiseen eristyslasissa. Sillä on olennainen vaikutus täytön nopeuteen, kaasuhukaan ja onnistumiseen.

Käsintäyttömenetelmissä eristyslasin kaasuväli täytetään joko valmiista eristyslasista tai eristyslasista, jossa on vasta primäärisaumaus. Välilistaan porataan reiät kaasun syötölle, ulosvirtaukselle sekä poistuvan kaasun pitoisuuden mittausanturille. Tavanomainen sisään- ja ulosvirtausaukkojen sijainti on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Tavanomainen eristyslasielementin kaasuntäytön sisään- ja ulosvirtausaukkojen sijainti.

Käsintäyttömenetelmää voidaan nopeuttaa tekemällä täyttö yhdellä laitteistolla useisiin eristyslaseihin samanaikaisesti. Kaasuputket kytketään rinnakkain siten, että jokaiseen elementtiin virtaa kaasua samalla nopeudella (kuva 23) ja suurimmasta lasista poistuvan kaasun happipitoisuutta tarkkaillaan.



Kuva 23. Elementtien täyttö rinnakkain.

Automaattitäyttömenetelmissä lasin pintaan asennetaan välilista kiinni primääritiivistyksen avulla ja päälle tuleva lasi asennetaan joko lähelle välilistaa tai osittain kiinni välilistan primääritiivistykseen. Kaasu johdetaan eristyslasiin välilistan ja lasilevyn välistä. Tarvittava kaasumäärä lasketaan elementin ulkomittojen mukaan tai määritetään poistuvan kaasun happipitoisuuden perusteella. Kone hoitaa prosessin automaattisesti.

4.7.3 Kaasutäytön kokeet

Kaasutäytön onnistumiseen vaikuttavat käytännön toteutuksessa monet asiat, joita ovat:

- eristyslasi-elementin koko ja muoto
- kaasun tulokohdan ja ilman poistumiskohdan sijainti eristyslasissa
- kaasun virtausnopeus
- täyttöletkun ja eristyslasin välisen liitoksen tiiviys
- täyttösuuttimien ominaisuudet
- kaasun tyyppi (tiheys, viskositeetti)
- välilistan tyyppi, kun kaasu täytetään elementtiin listan läpi
- käsintäyttöä valvovan kaasutunnistimen sijainti
- täytön lopetuksen kriteeri
- ylitäytön suuruus automaattitäytössä
- reunatiivistykset täytön aikana
- välilistaan jääneen ilman sekoittuminen kaasuun täytön jälkeen
- välilistassa olevan kuivikeaineen reagointi kaasun kanssa
- aikaviive täytön ja reikien sulkemisen välillä
- aikaviive täytön ja sekundääritiivistyksen välillä.

Kaasuntäytön epävarmuuden arvioimiseksi tehtiin joitakin täyttökokeita käsintäyttömenetelmällä. Näissä kokeissa arvioitiin erityisesti kaasun virtausnopeuden sekä täyttökohdan vaikutusta täyttöasteeseen.

Taulukko 6. Yhteenvedo ensimmäisestä täyttökokeesta.

Tiivistys täyttöhetkellä	Täyttökohta	Elementin mitat			Tilavuus (m ³)	Kaasumäärä (l)	Täytön monikerta	Aika (s)	Täyttönopeus (l/min)	Täyttöaste (%)
		lev. * kork.	* lasiväli (mm)							
primääri		709	1209	12	0.010	24.5	2.43			ei mitattu
primääri		919	1325	12	0.014	23	1.60	228	6.05	ei mitattu
primääri		919	615	12	0.0066	14	2.12	150	5.6	49
primääri + sekundääri	täyttö alalistan kulmasta, poisto vastakkaisen kulman sivulistan yläosasta	355	1039	12	0.0042	10.4	2.44	108	5.77	99.3
primääri + sekundääri	täyttö sivulistan alakulmasta, poisto vastakkaisesta kulmasta ylälistasta	355	1039	12	0.0042					92.8
primääri + sekundääri	täyttö sivulistan alakulmasta, poisto vastakkaisesta kulmasta ylälistasta	863	1001	12	0.010	18.3	1.80	185	5.93	94.8
primääri	täyttö sivulistan alakulmasta, poisto vastakkaisesta kulmasta ylälistasta	919	1325	12	0.014	25.2	1.75	253	5.97	ei mitattu
primääri	täyttö sivulistan alakulmasta, poisto vastakkaisesta kulmasta ylälistasta	919	1325	12	0.014	25	1.74	245	6.12	ei mitattu
primääri	täyttö sivulistan alakulmasta, poisto vastakkaisesta kulmasta ylälistasta	919	1325	12	0.014	28	1.95	278	6.04	91.3

Ensimmäisessä täyttökokeessa tehtiin eri kokoisille eristyslaselementeille täyttökokeita argonkaasulla. Täyttökohtien sijaintia muutettiin kokeiden aikana ja eristyslasin reunatiivistys täytön aikana oli joko pelkkä primääritiivistys tai primääri- ja sekundääritiivistys valmiina. Kaasun virtausnopeus oli noin 6 litraa minuutissa. Kaasuntäytön lopetuskriteerinä käytettiin täyttölaitteistoon vakioasetusta.

Taulukossa 6 on esitetty yhteenvedo tuloksista. Taulukon ensimmäisissä kokeissa selvitettiin eri kokoisten elementtien täytön monikertaa ja täyttönopeutta. Laitteistosta johtuen täyttönopeutta ei voinut säätää.

Virtausnopeus noin 6 litraa minuutissa johti käytetyllä lopetuskriteerillä kaasutäytön monikertaan 1,6 ... 2,4. Mitatut täyttöasteet eristyslaseissa olivat neljässä tapauksessa viidestä yli 90 %.

Yhdessä tapauksessa pitoisuus oli 49 %. Kyseisessä tapauksessa täyttö tehtiin eristyslasiin, jossa oli vain primääritiivistys ja johon sekundääritiivistys tehtiin kaasutäytön jälkeen. Aika kaasutäytön ja mittauksen välillä oli noin 1 tunti. Eristyslasista puuttui kokonaan tuon ajan sekundääritiivistys. Tämä koe osoittaa, miten tärkeää on heti kaasutäytön jälkeen sulkea täyttöreivät ja asentaa sekundääriti-

vistys. Taulukossa viimeisenä oleva koe osoittaa, että kohtalaisen hyvä täyttöaste voidaan saavuttaa, mikäli sekundaaritivistys asennetaan välittömästi kaasutäytön jälkeen.

Taulukon kolme alinta koetta on tehty saman kokoisille elementeille. Niissä tutkittiin täyttölaitteen tarkkuutta. Näissä kokeissa kaasun virtausnopeus oli kaikissa lähes sama ja kahdessa ensimmäisessä kaasumäärä oli myös sama. Kolmannessa kaasumäärä oli suurempi, mikä todennäköisesti johtui kaasun vuotamisesta letkun ja välilistan välisestä liitoksesta. Muissakin kokeissa huomattiin vuotoja tässä liitoksessa, joten sen tiiviyteen tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Täytön monikertaan vaikuttavat lasin koko ja muoto. Pienissä sekä kapeissa ja korkeissa laseissa monikerta on suurempi kuin suurissa ja neliömäisissä laseissa. Lisäksi edellä mainituissa laseissa täyttöaste jää jonkin verran jälkimmäisiä pienemmäksi. Tämä johtuu täytekaasun pyörteisistä virtauksista kaasutilassa.

Toisessa täyttökokeessa selvitettiin 649 mm * 1 325 mm * 12 mm eristyslaselementin täytön aikaisen asennon vaikutus kaasutäytön pitoisuuteen. Lisäksi verrattiin täyttöastetta kahdella virtausnopeudella. Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto tuloksista. Elementin täyttö pystyasennossa lyhyemmän sivun varassa johti noin 4 prosenttiyksikköä parempaan täyttöasteeseen kuin asennossa, jossa eristyslasi oli pidemmän sivun varassa.

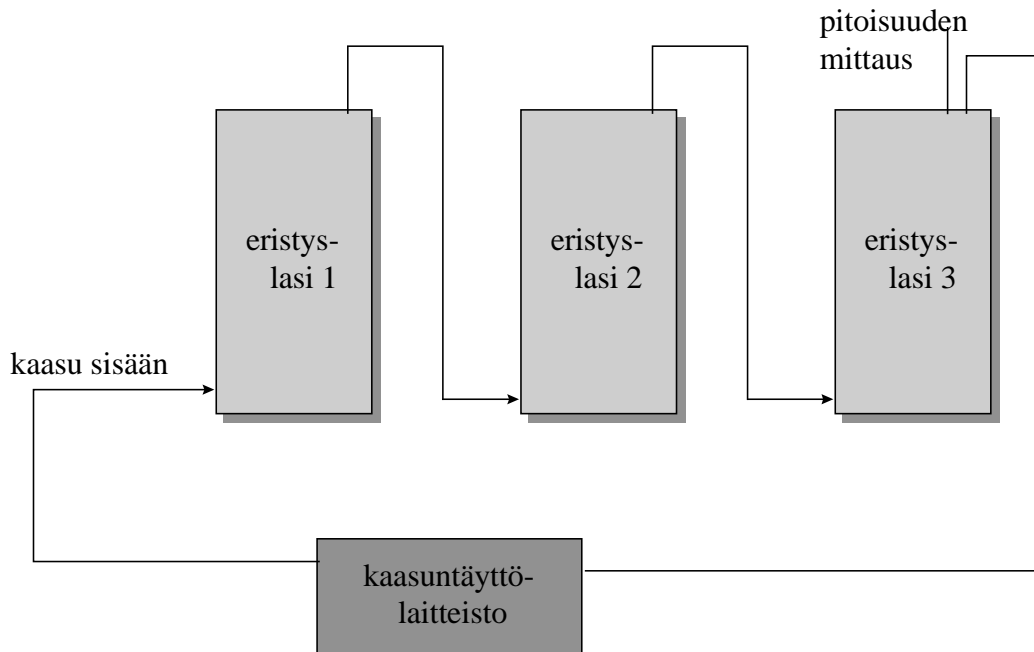
Kaasutäyttö virtausnopeudella 5,0 l/min johti täyttöasteeseen 89,4 % ja täyttö virtausnopeudella 2,3 l/min täyttöasteeseen 92,2 %. Virtausnopeuden 5,0 l/min käyttö johti täyttöaikaan 5 min 9 s ja virtausnopeuden 2,3 l/min täyttöaikaan 8 min 59 s. Parempi täyttöaste saavutetaan siis pienemmällä virtausnopeudella, mutta työhön tarvittava aika kasvaa. Pienempi virtausnopeus myös pienentää kaasun hukkaa (täytön monikerta pienenee).

Koe osoitti myös sen, että lasit kannattaa täyttää siten, että ne ovat lyhyemmän sivun varassa pystyssä (taulukko 7). Tällöin eristyslasin kaasun täyttöaste saadaan paremmaksi. Kun lasi täytetään tässä asennossa, kaasu pääsee kerrostumaan paremmin eikä lasien väliin purkautuva kaasu pääse sekoittumaan niin paljoa ilmaan.

Taulukko 7. Eristyslasin asennon ja kaasun virtausnopeuden vaikutus täyttöasteeseen.

Koe	Leveys (mm)	Korkeus (mm)	Tilavuus (l)	Täyttö-aika (s)	Virtausnopeus (l/min)	Täytön monikerta	Täyttöaste (%)
1	649	1325	25.7	309	4.99	2.61	89.4
2	1325	649	25.3	325	4.67	2.57	85.3
3	649	1325	21.1	539	2.35	2.14	92.2

Kolmannessa täyttökokeessa selvitettiin eristyslasielementtien täyttöaste, kun kolme eristyslasia ketjutettiin täytön aikana siten, että täytekaasu virtasi elementin 1 läpi elementtiin 2 ja edelleen elementtiin 3 (kuva 24). Elementtien kokona oli 165 mm * 1039 mm * 12 mm ja elementit olivat pystyasennossa lyhyen sivun varassa. Kaasutäytön virtausnopeus oli 2,0 l/min ja täyttöaika 3 min 15 s. Tämä johti täytön monikertaan 1,2. Täytekaasun täyttöaste elementissä 1 oli 86 %, elementissä 2 96 % ja elementissä 3 93 %.



Kuva 24. Elementtien ketjutus kaasutäytön aikana.

Täyttökokeet osoittivat, että riittävän kaasupitoisuuden toteuttaminen vaatii huolellista työtä. Mitä pienemmällä virtausnopeudella täyttö toteutetaan, sitä parempi lopputulos saavutetaan ja pienemmällä kaasuhävikillä selvittää. Käytäntö on kuitenkin johtanut sellaisten virtausnopeuksien käyttöön, mikä johtaa kohtuullisen lyhyeen täyttöaikaan. Kun täytön monikerta on noin 2, se johtaa kohtuullisen hyvään lopputulokseen (vertaa kuva 21).

Täyttökokeiden perusteella voidaan kuitenkin todeta, että yli 90 %:n täyttöasteen saavuttaminen on mahdollista, mikäli laitteiston toiminta on varmistettu ja täyttönopeus on riittävän pieni. Eristyslasit tulee olla täytettäessä pystyssä lyhyemmän sivunsa varassa, kaasu johtaa lasin sisään alakulmasta ja ilma poistaa lasista vastakkaisesta yläkulmasta.

Kaasutäytön pitoisuuden varmistaminen eristyslasivalmistuksessa on äärimmäisen tärkeä toimenpide, jota ei käytännöllisistä syistä vielä tehdä linjastolla, koska helppoa tapaa mitata ei vielä ole.

5 YHTEENVETO

Nykyisin ikkunan lasiosan komponenttien tunnistaminen valmiista ikkunasta ei ole yhtä helppoa kuin ennen uuden lasiteknologian vuoksi. Ennen, kun käytettiin tavallisia laseja erillislaseina jokaisen lasin paksuus voitiin mitata mittakellolla avatusta ikkunasta. Nykyisin eristyslasin lasien paksuuksien, lasien välisten etäisyyksien, täytekaasun tyyppin ja täyttöasteen määrittäminen sekä selektiivilasien toteaminen ja emissiviteetin määrittäminen tuottavat vaikeuksia.

Tutkimuksessa selvitettiin menetelmät ja laitteet, joilla voidaan määrittää ikkunaa vaurioittamatta lasien paksuudet, mahdolliset laminoidut lasit, lasien väliset etäisyydet, selektiivilasit ja selektiivipintojen sijainti.

Nykyisin ei vielä ole markkinoilla laitteita, joilla voisi mitata ikkunaa vaurioittamatta selektiivilasin emissiviteetin tai tunnistaa lasin lävitse eristyslasin täytekaasun ja mitata sen täyttöasteen. Selektiivilasin emissiviteetin määrittäminen edellyttää eristyslasin yhden lasin rikkomista ja täytekaasun määrittäminen reiän tekemistä eristyslasin välilistaan.

Täytekaasun tunnistustekniikkana tällä hetkellä lupaavimmalta vaikuttaa ionisoituneen kaasun emittoiman säteilyn tunnistamiseen perustuva menetelmä. Tältä pohjalta Helsingin yliopiston fysikaalisen kemian laitos pyrkii kehittämään eristyslasien kaasuntunnistusta varten suunnitellun laitteen vuoden 1999 aikana. Tavoitteena on, että tämä laite olisi myynnissä vuoden 2000 alussa.

Suomessa ei ole vaatimusta kaasutäytteisten eristyslasien kaasupitoisuudelle. Syynä tähän on pääosin ollut hinnaltaan kohtuullisten ja eristyslasia vahingoittamattomien mittaustaitteiden puute. Näiden mittareiden markkinoilletulo nopeuttaa kaasupitoisuuden vaatimuskriteerien laadintaa ja edellä mainitun tekijän ottamista eristyslasivalmistajien laadunvalvonnan osaksi.

Tutkimuksessa käsintäyttölaitteella tehdyissä eristyslasien kaasuntäyttökokeissa havaittiin, että eristyslasit on mahdollista täyttää yli 90 %:n täyttöasteeseen. Tällöin tarvittiin noin kaksinkertainen kaasumäärä lasin tilavuuteen verrattuna. Hyvän täyttöasteen saavuttamiseksi laitteistoa pitää huoltaa määrävälein, kaasun täyttönopeus ei saa olla liian suuri ja täytettävän lasin tulee olla lyhyemmän sivun varassa pystyssä.

Tutkimuksessa kovapinnoitetun selektiivilasin käytettävyyttä erillislaseina ikkunas- sa arvioitiin pesukokeen, likaamiskokeen ja säärasituskokeen perusteella. Näissä kokeissa ei tullut ilmi sellaisia tekijöitä, jotka estäisivät lasin käytön erillislaseina. Kokeet olivat kuitenkin verraten suppeat eikä niissä otettu huomioon kaikkia rasitustekijöitä, minkä vuoksi kovapinnoitettua selektiivilasia käytettäessä erillislaseina tulee tiedostaa pieni riskin mahdollisuus.

LÄHDELUETTELO

- 1 Brook, H., Theoretical fundamental principles related to the gas filling technology of multi-pane insulating glass units. *Glaswelt*. Volume 8/93. s. 56.
- 2 Elmahdy, A. H. & Yusuf, S., A., Determination of argon concentration and assessment of the durability of high-performance insulating glass units filled with argon gas. *ASHRAE Transactions: Symposia*. SD-95-10-3. s. 1026 - 1037. 1995.
- 3 Feldmeler, F. & Schmid, J., Gasdichtheit von Mehrschieben-Isolierglas. *Bauphysik* 14 (1992). s. 12 -17.
- 4 Gross, J. & Fricke, J., Non-destructive In-situ determination of the Rare Gas Content of highly insulating Glazing Units. s. 61 - 72.
- 5 Lide, D., R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 71st edition, 1990 - 1991.
- 6 Owens, R., Tests Asses Gas Loss of Insulating Glass Units. *Glass Digest*, August 15, 1990. s. 81 - 85
- 7 Ryti, H., *Standardi-ilmakehä*. Tekniikan käsikirja, osa 2. s. 187 - 226. 8. painos. 1966.
- 8 Ryti, H., *Termodynamiikka*. Tekniikan käsikirja, osa 2. s. 605 - 765. 8. painos. 1966.
- 9 Unger, G., Gaspermeation von Isoliergläsern. *Glaswelt* 9/1991. s. 66 - 76.
- 10 Wolf, A., Studies into the Life-Expectancy of Insulating Glass Units. *Building and Environment*, vol 27, No 3. s. 305 - 319. 1992.
- 11 *Gas-filled Insulating Glass Units*. Chemetall GmbH. 9 s.
- 12 European Standard prEN 1279-3, *Glass in buildings - Insulating glass units - Part 3: Initial type testing on gas-filled insulating glass units; gas leakage rate*. Draft. May 1995. 26 s.
- 13 European Standard prEN 673, *Glass in buildings -Determination of thermal transmittance (U-value) - Calculation method*. Final draft. June 1997. 18 s.
- 14 *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. Oy Strömberg Ab. 448 s.
- 15 *WINDOW 5.01, Spectral glazing data*. National Fenestration Council. 1998.