

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikka
Noora Vierimaa

Opinnäytetyö

Lasiin iskunkestävyyden testausmenetelmä

Työn ohjaaja Anne Ojala

Tampereen ammattikorkeakoulu

Kemiantekniikka

Työn tekijä	Noora Vierimaa
Työn nimi	Lasien iskunkestävyyden testausmenetelmä
Sivumäärä	51 sivua
Valmistumisaika	4/2011
Työn ohjaaja	Anne Ojala
Työn tilaaja	Iittala Group Oy Ab

TIIVISTELMÄ

Työssä lähdettiin selvittämään Iittalan lasituotteiden reunaniskunkestävyyttä. Iskunkestävyyttä mitattiin siihen tarkoitettulla laitteistolla Helsingin Arabian laboratoriotiloissa. Työn tarkoituksena oli saada vertailukelpoisia mittaustuloksia reunaniskunkestävyydestä eri menetelmillä valmistetuille lasituotteille. Aineistosta osa oli salaista, minkä takia tehtiin luottamuksellisuussopimus yrityksen kanssa. Työssä tutkittiin myös muutaman muun markkinoilla olevan kaupallisen lasin vastaavia kestävyyskysymyksiä.

Koska lasituotteilta vaaditaan markkinoilla yhä parempaa kestävyyttä, työ oli merkittävä Iittalan tehtaalle. Tämän opinnäytetyön avulla yritys toivoi saavansa myös kattavan ohjeistuksen kyseiselle testausmenetelmälle jatkoa ajatellen.

Lasituotteiden välille saatiin vertailukelpoisia tuloksia käyttäen olemassa olevaa mittauslaitteistoa. Tulosten avulla voidaan myöhemmin perehtyä mahdollisesti myös lasimassaan tehtäviin muutoksiin. Luotettavien mittaustulosten saamiseksi mittauslaitteiston joitain osia tulisi muuttaa tulevaisuudessa. Menetelmää voi myös jatkossa soveltaa erimuotoisille lasituotteille.

Avainsanat

Iskunkestävyys, lasituote, testausmenetelmä, mittauslaitteisto

TAMK University of Applied Sciences

Chemical engineering

Writer	Noora Vierimaa
Thesis	Test method for shock resistance of glass
Pages	51 pages
Graduation time	4/2011
Thesis Supervisor	Anne Ojala
Co-operative company	Iittala Group Oy Ab

ABSTRACT

In this thesis were analyzed Iittala glass products, more particular shock resistances. Shock resistances were measured by using a dedicated hardware in Helsinki Arabia laboratory facilities. The purpose was to obtain comparable measuring results from the edge of the shock resistance of glass products produced in different ways. Data was part classified, why there was a confidentiality agreement with the company. There are plenty of other similar glass products in the market and a few were also tested by using this method.

In the market requirements towards glass products have been increased. With the assistance of this thesis, Iittala glass factory hoped to get a comprehensive guidance to the testing method for future developments.

In this thesis it was possible to get comparable results between glass products by using existing measurement equipment. With the results it is possible to get acquainted also with raw material changes of glass. To get reliable measurement results in the future, some parts of the measurement equipment should be modified. This method can also be used for multiple/different shapes of glass products.

Keywords	Shock resistance, glass product, testing method, measurement equipment
----------	--

Esipuhe

Opinnäytetyön tekemisestä muodostui koko opiskeluaikani haasteellisin projekti. Olen kiitollinen siitä, että sain näin mielekkään työn Iittalan lasitehtaalta, ja että pääsin aloittamaan työn suhteellisen nopealla aikataululla.

Lasikeraaminen ala oli minulle entuudestaan täysin tuntematon, ja siksi oli varsin mielenkiintoista lähteä opiskelemaan sitä tarkemmin. Haluan erityisesti kiittää Tarja Aarista, jonka ansiosta sain toteuttaa tämän työn Iittalan lasitehtaalle. Erityiskiitokset kuuluvat myös lasikemisti Erik Vedelille, joka perehdytti minua lasiteollisuuden maailmaan. Haluan myös kiittää Helsingin Arabian tehtaan laboratoripuolen henkilökuntaa, joka oli valmis auttamaan minua mittaustöiden puitteissa sekä lisämateriaalin etsinnässä. Kiitokset kuuluvat myös opinnäytetyön ohjaajalleni Anne Ojalalle, joka auttoi minua useissa opinnäytetyötä koskevissa kysymyksissä sekä työn tarkistuksessa. Kiitokset kuuluvat myös perheelleni, ja erityisesti Seppo Huovilaiselle.

Tampereella huhtikuussa 2011

Noora Vierimaa

Sisällysluettelo

1 Johdanto	7
2 Iittala Group Oy Ab.....	8
2.1 Historiaa	8
3 Mitä lasi on?	10
3.1 Lasin raaka-aineet	11
3.1.1 Lasinmuodostajat	12
3.1.2 Liuottajat	13
3.1.3 Stabilisaattorit	13
3.1.4 Väriaineet.....	13
3.1.5 Selkeyttäjä ja siru.....	14
3.2 Lasin päätyypit	15
3.2.1 Alkalikalkkilasi	15
3.2.2 Lyijylasi	15
3.2.3 Boorisilikaattilasi	16
3.3 Lasin ominaisuudet	16
3.3.1 Viskositeetti	17
3.3.2 Lasin kiteytyminen.....	17
3.3.3 Pintajännitys.....	17
3.3.4 Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	18
3.3.6 Kemialliset ominaisuudet.....	19
4 Lasin valmistusprosessi.....	20
4.1 Sulatusprosessi	20
4.2 Lasin työstömenetelmät.....	22
4.2.1 Puhaltaminen.....	22
4.2.2 Prässäys.....	22
4.2.3 Keskipakovalumenetelmä	23
4.2.4 Puristuspuhallusmenetelmä.....	23
4.3 Lasin jäähdytys ja jälkikäsittely	24
4.3.1 Temperoitu lasi	25
5 Teoriaa iskunkestävyydestä.....	26
6 Ohjeistus lasin iskunkestävyyden testaamiselle	29
6.1 Mittauslaitteiston rakenne ja toiminta	29
6.2 Alkutoimenpiteet.....	34

6.3 Koemenetelmä.....	34
6.4 Iskeminen	34
6.5 Tulosten tarkastelu	35
7 Testilasien tulosten tarkastelu	36
7.1 Suupuhalletut lasit (A ₁ , A ₂ , B ₁ , B ₂ , B ₃ , C, D, E, F).....	36
7.2 Prässituotteet (G, H, I, J, K).....	39
7.3 Prässituotteet (L ja M).....	43
7.4 Boorisilikaattilasit (N, O, P).....	44
7.5 Prässituotteet Q ja R.....	46
8 Yhteenveto	47
8.2 Itsearviointia.....	48
Lähteet.....	50
Liitteet	51

1 Johdanto

Lasi on aine, johon törmäämme lähes päivittäin ainakin jossain muodossa. Se on materiaalina kovaa mutta haurasta. Lisäksi lasi sietää useimpia liuoksia, eristää lämpöä sekä on herkkä iskuille. Kaikilla materiaaleilla on niille tyypilliset ominaisuudet. Esimerkiksi muovi ei kestä korkeita lämpötiloja, metallit ovat kovia, puu on pehmeää jne. Kaikki ominaisuudet eivät ole yhtä tärkeitä, mutta voivat tosin olla erittäin merkittäviä silloin kun materiaalia työstetään. Lasin oikea luonne riippuu paljolti siitä, miten se on valmistettu, sekä siitä, millainen atomikoostumus lasilla on. Näistä syistä lasi eroaa muista materiaaleista.

Lasituotannossa pyritään tuottamaan asiakkaalle laadultaan yhä parempia ja kestävämpiä tuotteita. Laseilta vaaditaan mm. yhä parempaa iskunkestävyyttä, jotta lasilla olisi mahdollisimman pitkä käyttöikä. Tästä syystä tämä opinnäytetyö tehtiin selvittämään nykyisen lasituotannon tuottamien tuotteiden reunaniskunkestävyyttä.

Työn alkuosassa on tarkasteltu yleisesti lasin koostumusta ja sen valmistuksen eri vaiheita. Iskunkestävyyden osiossa käydään läpi teoriaa sekä esitellään mittauslaitteiston toimintaperiaatteet. Lisäksi mittauslaitteistolle on laadittu suomenkieliset käyttöohjeet, joita voidaan hyödyntää tulevaisuudessa kyseiselle mittauslaitteistolle. Työohjeiden luominen edellytti tutustumista niin lasituotantoon kuin mittauslaitteiston toimintaan.

Työn lopussa on käsitelty mittaustuloksia niissä rajoissa, jotka salassapito sallii. Työohjeiden laatimisen lisäksi tarkoituksena oli myös löytää yhtäläisyyksiä testattujen lasien väliltä sekä pohtia syitä, jotka mahdollisesti aiheuttavat lasin herkän rikkoutumisen.

2 Iittala Group Oy Ab

Iittala Group on pohjoismaisen muotoilun johtava yritys. Iittala Groupin kotimarkkinoiksi voidaan luokitella Suomen lisäksi Ruotsi, Norja, sekä Tanska. Näillä alueilla Iittala Groupin vahva johtoasema perustuu sen vahvoihin brändeihin, kuten Arabia, Fiskars, Iittala, BodaNova, Höganäs Keramik, Röstrand ja Raadvad.

Kansainvälisillä markkinoilla Iittala Group pyrkii kasvamaan yhä enemmän pääasiassa Iittala -brändin ja Iittala-myymälöiden avulla.

Henkilöstöä Iittala Groupilla on noin 1400. Nykyään Iittala Group kuuluu Fiskars-konserniin.

2.1 Historiaa

Iittalan lasitehdas on toiminut jo vuodesta 1881 lähtien. Lasitehtaan perusti ruotsalainen mies nimeltä Petrus Magnus Abrahamsson. Koska Suomessa ei vielä tuolloin ollut ammattitaitoisia lasinpuhaltajia, työvoima tuli Ruotsin puolelta. Vuodesta 1917 aina 1950-luvulle asti omistajana toimi A. Ahlström Osakeyhtiö.

Aluksi tehdas valmisti pääasiassa apteekkilasia, pulloja ja öljylamppulaseja. Myös talouslasia tuotettiin jonkin verran. 1930-luvun jälkeen Iittala alkoi valmistaa erilaista lasia kuin aiemmin. Iittalan lasitehtaasta muodostui lasitehteen edelläkävijä, kun Aino Aallon ”Aino Aalto” - lasisto sekä Alvar Aallon Aalto-maljakkosuunnitelmiin 1930-luvun puolivälissä.

Sotien aikana toiminta loppui raaka-aine ja työvoimapulaksi. Toiminta kuitenkin käynnistettiin uudelleen sotien loputtua, mutta tehdas oli tuolloin huonossa kunnossa. Sodan jälkeen Iittala oli kuitenkin kasvava yritys aina 1970-luvun lopulla käytyyn öljykriisiin asti. Tällöin myös Iittalan lasitehdas sai kärsiä lamasta, ja joutuikin supistamaan niin työvoimaa kuin tuotantoa.

Iittalan lasitehtaalla on ollut varsin laaja omistajakirjo. Iittalan lasitehdas on vuosien saatossa kuulunut muun muassa niin Wärtsilä Oy:lle, Hackman Oyj:lle, kuin ollut ABN

AMRO Capitalin omistuksessa. Vuoden 2006 loppupuolella Iittalasta tuli osakeyhtiö, ja sen nimeksi muodostui Iittala Group Oyj.

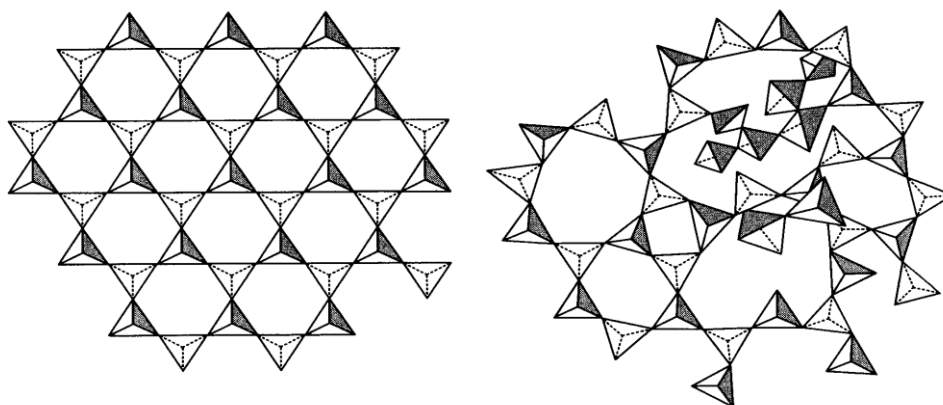
Vuonna 2007 kesäkuussa Fiskars Oyj osti Iittalan osakekannan, ja siitä tuli Iittalan uusi omistaja.

3 Mitä lasi on?

Lasiksi kutsutaan sellaista ainetta, joka on saatu aikaiseksi sulattamalla erilaisia orgaanisia tai epäorgaanisia aineita, kuten silikaatteja tai niiden seoksia. Kuuman sulatteen annetaan jäähtyä siten, että se tietyllä lämpötila-alueella sitkistyy niin, etteivät sen atomit enää asetu alkuperäiseen kiteiseen muotoon. Täten lasimassa jää jähmettyttyään lasitilaan, jossa ei ole säännöllistä kiderakennetta. Lasia kutsutaan täten amorfiseksi aineeksi.

Lasi voi koostua yhdestä oksidista (mm. piidioksidi) tai useammasta aineesta. Lasin muodostavan aineen ei välttämättä tarvitse olla oksidi, vaan se voi koostua myös esimerkiksi vain yhdestä alkuaineesta (mm. seleeni). Suurin osa käyttöön tarkoitettu lasista on kuitenkin lähes aina valmistettu piidioksidista.

Yleensä lasi on jähmettyttyään läpinäkyvää, haurasta ja kovaa. Koska lasi valmistetaan usein hyvin monesta eri raaka-aineesta, lopputuotteet ovat erilaisia. Kaikilla laseilla on kaksi samaa ominaisuutta; sen lisäksi, että kaikki lasit ovat amorfisia, kaikilla laseilla on myös tietty alue, jossa tapahtuu muutos lasiksi (lasisiirtymä). Lasi ei johda sähköä juurikaan, kun se on jähmettyneessä tilassa. Sen sijaan se johtaa hyvinkin sähköä välitilassa, ennen kuin se on juoksevaa. Lasi ei myöskään johda erityisen hyvin lämpöä, minkä vuoksi se täytyy jäähdyttää hitaasti jännitteiden syntymisen estämiseksi.



Kuvio 1: Kiteinen piidioksidi ja amorfinen piidioksidi. (Anne, Tähtivaara, Pro gradu-tutkielma, 2008)

3.1 Lasin raaka-aineet

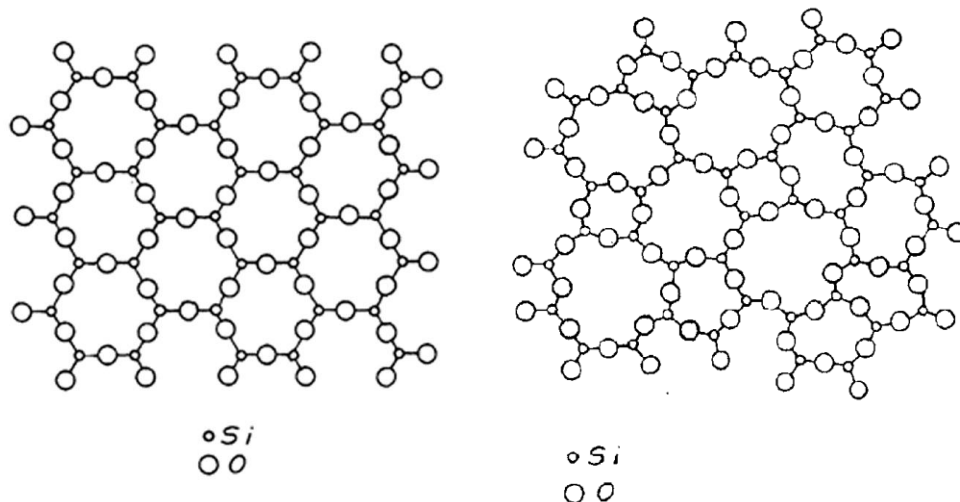
Mänkiin eli lasimassaan tulevia aineita on yhteensä viisi. Ne voidaan luokitella niiden tehtävien perusteella. Aineet voidaan jakaa lasinmuodostajiin, liuottajiin, stabilisaattoreihin, väriaineisiin sekä selkeyttäjiin. Lasin tärkein osa on kuitenkin lasinmuodostaja. Lasinmuodostaja muodostaa lasin verkkorakenteen. Tähän tarkoitukseen käytetään yleisesti piidioksidia (SiO_2), boorioksidia (B_2O_3) tai fosforioksidia (P_2O_5). Yleisimmin kaupallisena lasinmuodostajana käytetään puhdasta ja seulottua kvartsihiekkää. Yleensä piidioksidin pitoisuus kvartsihiekkasta vaihtelee välillä 60- 80 %. Iittalassa käytetty lasimassa koostuu keskimäärin noin 70% kvartsihiekkasta, 15% soodasta ja 15% kalkista sekä muista lisätyistä aineista.

Raaka-aine	Kemiallinen kaava	Lasia muodostava oksidi	Prosenttia oksidista/%
Hiekka	SiO	SiO_2	99,8
Natriumkarbonaatti	Na_2CO_3	Na_2O	58,5
Kalkkikivi	CaCO_3	CaO	56,0
Dolomiitti	$\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$	CaO	30,5
		MgO	21,5
Maasälpä	$\text{K}_2(\text{Na}_2)\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-6SiO}_2$	SiO_2	68,0
		Al_2O_3	18,5
		$\text{K}_2(\text{Na}_2)\text{O}$	12,8
		SiO_2	68,0
Nefeliini syeliitti	NaAlSiO_4	SiO_2	60,6
		Al_2O_3	23,3
		$\text{Na}_2(\text{K}_2)\text{O}$	14,8
Natriumboraatti	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-5H}_2\text{O}$	Na_2O	21,8
		B_2O_3	48,8
Boorioksidi	H_3BO_3	B_2O_3	56,3
Lyijyoksidi	PbO	PbO	99,9
Vedetön potaska	K_2CO_3	K_2O	68,0
Sinkkioksidi	ZnO	ZnO	100,0
Bariumkarbonaatti	BaCO_3	BaO	76,9

Taulukko 1: Lasinvalmistuksessa esiintyvät raaka-aineet. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

3.1.1 Lasinmuodostajat

Piidioksidilla on erittäin hyvät lasinmuodostusominaisuudet, koska sulana piiatomia ympäröi neljä happiatomia, jolloin syntyy pii-happi tetraedri (SiO_4^{4-}). Nämä tetraedrit ovat sitoutuneet muihin atomeihin kaikista neljästä kulmastaan, jolloin syntyy kolmiulotteinen verkkorakenne. Jokainen happiatomi sitoutuu puolestaan kahteen piiatomiin. Koska happi on sitoutunut vain kahteen piiatomiin, massan rakenne on hyvin joustava. Tämän joustavuuden takia on mahdollista, että muodostuu satunnaisia sidoksia sulassa massassa. Sulassa massassa sidokset kuitenkin katkeilevat ja muodostuvat koko ajan uudelleen. Sitoutumisesta johtuen aiheutuu niin suuri viskositeetti, etteivät atomit pysty muodostamaan järjestynyttä rakennetta, eikä näin ollen kiteytymistä pääse tapahtumaan.



Kuvio 2: Kiteisen piidioksidin ja piidioksidilasin rakenteiden kaksiulotteiset esitykset. (Anne, Tähtivaara, Pro gradu- tutkielma, 2008)

3.1.2 Liuottajat

Jos lasimassaan käytettäisiin pelkästään piidioksidia, tulisivat kustannukset liian suuriksi. Tämä johtuu piidioksidin hyvin korkeasta sulamispisteestä, joka on yli 1700 °C. Lasimassan joukkoon lisätään näin ollen kalsinoitua soodaa eli natriumkarbonaattia (Na_2CO_3). Se toimii liuottajana alentaen manganin sulamiseen tarvittavaa lämpötilaa. Kvartsihiekasta ja soodasta muodostuneen lasimassan kemiallinen kestävyys on niin huono, että se liukenee valettaessa jopa kuumaan veteen. Kyseistä vesilasaa (natriumsilikaattia) käytetään esimerkiksi liimoissa, kosmetiikassa sekä puhdistusaineissa. Nykyään sooda on synteettisesti valmistettava tuote, mutta entisaikaan soodan lähteenä käytettiin tiettyjen kasvien tuhkaa.

3.1.3 Stabilisaattorit

Kuten edellä mainittiin, liuottajien käyttö aiheuttaa monien lasiominaisuuksien huonontumista. Erityisesti lasimassan kemialliset ominaisuudet muuttuvat. Tämän vuoksi massaan lisätään myös nk. stabilisaattoreita. Yleensä käytetyt stabilisaattorit ovat maa-alkalimetalleja, siirtymämetalleja ja alumiinioksidia (Al_2O_3). Yleisimmin käytetty stabilisaattori on kalkkikivi eli kalsiumkarbonaatti (CaCO_3).

3.1.4 Väriaineet

Väriaineet ovat yleensä erilaisia metallioksideja. Ne ovat joko 3d-siirtymämetallien tai 4f-maametallien oksideja. Värit johtuvat näkyvän valon eri aallonpituuksien absorboitumisesta. Valon energia saa elektroneja virittymään. Viritystila kestää kuitenkin vain hetken, jonka jälkeen elektronit palautuvat alkuperäiselle alemmalle energiatasolle. Tästä aiheutuu energian purkautuminen säteilynä sekä värin havaitseminen.

Lisäämällä lasiin kobolttia Co^{2+} saadaan aikaiseksi sininen väri. Mn^{3+} puolestaan antaa purppuranpunaisen ja Cr^{3+} vihreän värin.

Hiekassa on usein lukuisia epäpuhtauksia, esimerkiksi rautaoksideja. Nämä oksidit aiheuttavat lasiin vihertävän värin. Rautaa ei tarvita värin muuttamiseksi kuin vain pieni määrä; jo 0,01 % on riittävä määrä muuttamaan lasin värin. Fe^{3+} aiheuttaa keltaisen värin ja Fe^{2+} vihertävän värin. Kahdenarvoista rauta-iona voidaan hapettaa

kolmenarvoiseksi erilaisilla hapettavilla aineilla. Tällöin väristä saadaan hieman vaaleampi. Hyvänä esimerkkinä on mangaanioksidi (MnO_2), joka hapettaa raudan kolmenarvoiseksi. Samalla sen väri toimii vastavärinä kolmenarvoisen raudan keltaiselle neutraloiden tämän.

3.1.5 Selkeyttäjä ja siru

Mänkiin lisätään myös selkeyttäjiä. Nämä poistavat mängistä kaasukuplia, joita syntyy sulatuksen aikana. Selkeyttäjiä on tarve lasinvalmistusprosessissa on niin pieni, ettei näiden lisäys vaikuta lopullisiin lasiominaisuuksiin.

Lasin valmistuksessa syntyvää hylkylasia kutsutaan siruksi. Murskattua sirua lisäämällä lasimassan sekaan saadaan nopeutettua raaka-aineen sulamista. Lisäksi sirun käyttö lasimassassa on taloudellisesti kannattavaa. (Anna Tähtivaara, Pro gradu – tutkielma, 2008)

3.2 Lasin päätyypit

Lasin kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet riippuvat siihen käytetyistä raaka-aineista. Seuraavaksi on käsitelty yleisimpiä lasityyppejä ja kyseisten lasien ominaisuuksia.

3.2.1 Alkalikalkkilasi

Yleisin lasilaji on natronkalkkilasi, jota kutsutaan myös soodallasiksi. Sen pääkomponentit ovat piidioksidi (70-75%), natriumoksidi (12-17%) ja kalsiumoksidi (7-14%). Näiden lisäksi se sisältää myös pienempiä määriä esimerkiksi kalium-, magnesium- ja alumiinioksideja. Yleisimpiä natronkalkkilasin käyttökohteita ovat mm. talouslasi, tasolasi sekä pakkauslasi. (<http://prosessiteknikka.kpedu.fi/doc-html/lasi.html>).

3.2.2 Lyijylasi

Lyijylasia kutsutaan myös kristallilasiksi. Sen pääraaka-aineet ovat kvartsihiekkä, kaliumkarbonaatti sekä lyijyoksidi. Iittalan tuottama lasi on lyijytöntä ja täten ympäristöystävällistä. Iittalan lasimassa kuuluu kuitenkin kristallilaseihin. Lasi luokitellaan sen koostumuksen ja fysikaalisten ominaisuuksien perusteella eri kristalliluokkiin. Nämä kristalliluokat on määritetty EU:n standardissa:

Taulukko 2: Kristalliluokat EU:n standardin mukaan (Diaesitys, Iittala)

	Metallioksidi (%)	Ominaispaino (kg/dm ³)	Valontaittoindeksi
Täyskristalli	PbO ≥ 30	≥ 3,00	> 1,54
Lyijykristalli	PbO ≥ 24	≥ 2,90	> 1,54
Kristalli(Iittala)	ZnO+BaO+K ₂ O ≥ 10	≥ 2,45	≥ 1,52

3.2.3 Boorisilikaattilasi

Boorisilikaattilasissa on käytetty piidioksidin sijaan alumiini- ja boorioksideja. Paitsi että boorisilikaattilasi on sekä mekaanisesti ja kemiallisesti kestävä, se kestää myös lämpötilavaihteluita. (<http://prosessiteknikka.kpedu.fi/doc-html/lasi.html>).

Boorioksidi (B_2O_3) muodostaa erittäin helposti lasia. Jokainen booriatomi on puhtaassa boorioksidilasissa kolmen hapen ympäröimänä ja jokainen happi on sitoutunut kahteen booriin.

Kuten boorioksidilasissa, myös boorisilikaattilasissa eli boorioksidipiioksidilasissa jokainen boori on sitoutunut kolmeen happeen. Jokainen pii on vastaavasti sitoutunut tetraedrisesti neljään happiatomiin, ja jokainen happiatomi on sitoutunut kahteen kationiin, joko kahteen booriin tai kahteen piihin, tai booriin ja piihin. Rakenne on tällöin verkkomainen ja kolmiulotteinen.

Boori voi muodostaa sekä tasokolmion BO_3 sekä tetraedrin BO_4 . Sekä kiteinen että amorfinen boorioksidi koostuvat vain tasokolmioista. Alkalioksideja lisättäessä boorioksidin sekaan, tasokolmiot muuttuvat tetraedreiksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti.



3.3 Lasin ominaisuudet

Lasilla on useita eri ominaisuuksia. Lasin ominaisuudet riippuvat hyvin pitkälti lasin koostumuksesta. Viskositeetti on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista lasia valmistettaessa, kun taas lämpölaajenemiskertoimella on selkeästi vähäisempi merkitys. Eniten lasin valmistuksessa on merkitystä sen kestävyydellä.

3.3.1 Viskositeetti

Viskositeetti on eräänlainen mitta sille, miten jähmeää jokin aine on. Koska lasimassa on erittäin sitkeä aine, sillä on hyvin suuri viskositeetti. Lasimassasta tulee sitä sitkeämpää, mitä alempi lämpötila sillä on.

Viskositeetti vaikuttaa moneen asiaan lasinvalmistuksessa. Se vaikuttaa esimerkiksi siihen, miten raaka-aineet sulavat, kuinka lasia muotoillaan, kuinka lasi puhdistetaan, kuinka lasi kristallisoidaan, ja kuinka jännitykset saadaan poistettua lasista.

Käsin valmistettujen vaasien ja automatisoidusti valmistettujen lasien valmistuksessa on suuria eroja. Lasin viskositeettiin tulee perehtyä niin, että se soveltuu erilaisille valmistusmenetelmille. Lasin viskositeetti riippuu paljolti siitä, millainen koostumus ja lämpötila lasilla on.

3.3.2 Lasin kiteytyminen

Ruokasuola on yleisin tunnettu kide huoneenlämpötilassa. Sillä on tietty lämpötila, jossa sen tiedetään sulavan. Lasilla sen sijaan ei ole mitään tiettyä sulamispistettä, koska sillä ei ole säännöllistä kiderakennetta. Mahdollisuus, että lasi kiteytyisi, on normaalitilanteessa hyvin pieni, koska lasin rakenne poikkeaa niin paljon suoloista. (Boken om glas, 18)

3.3.3 Pintajännitys

Pintajännityksellä on suuri merkitys lasinvalmistuksessa. Pintajännitystä esiintyy yleisesti lasin pinnalla. Jos lasissa esiintyy paljon jännityksiä, syntyy siihen helpommin huokosia.

Jäähtyessään lasi kutistuu hieman. Tästä kutistumisesta aiheutuu jännitystä silloin, jos jäähtyminen ei ole hallittua. Tästä johtuen jännitykset pyritään poistamaan jäähdytysuunissa n. 2-36 h aikana tuotteen paksuudesta riippuen.



Kuvio 3: Pintajännitys on tärkeää, kun otetaan lasimassaa uunista. Jos jännitys on liian korkea, lasimassaan tulee helposti huokosia. (<http://www.thegeminigeek.com/how-to-melt-glass>, kuvateksti Noora Vierimaa)

3.3.4 Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Vaikka lasit ovat huonoja sähkönjohteita, toiset lasit ovat parempia eristeitä kuin toiset. Suurin osa laseista on ionijohteita ja muutamat elektronijohteita.

Lasi on haurasta materiaalia, kuten jo aiemmin on todettu. Lasi eroaa muista materiaaleista siten, että siihen muodostuu helposti särö, jos siihen lyödään jollain esineellä. Lasi on täysin elastinen murtoon asti. Jos lasiin kohdistuva voima on tarpeeksi suuri, lasi särkyy. Lasiin ei kuitenkaan jää jälkiä pysyvästä muodonmuutoksesta, kun lasi särkyy.

3.3.6 Kemialliset ominaisuudet

Lasin ajatellaan usein olevan hyvinkin inertti aine. Tosin monet lasit ovat kemiallisesti reaktiivisia riippuen lasin koostumuksesta. Lasi voi esimerkiksi hajota hyvinkin nopeasti fluorivetyhapon vaikutuksesta.

Lasi on kuitenkin erittäin kestävä, koska siinä ei tapahdu mitään kemiallisia muutoksia. Täten voidaan todeta, että lasien kestävyys on niiden kykyä vastustaa esimerkiksi veden, hiilidioksidin, happojen, emästen sekä erilaisten suolojen aiheuttamaa korroosiota. (Boken om glas)

4 Lasin valmistusprosessi

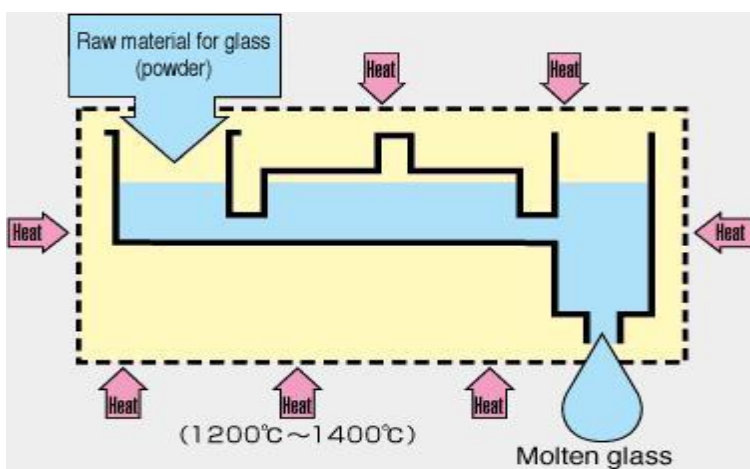
Lasinvalmistus on nykyään lähes kokonaan automatisoitu lukuun ottamatta taidelasituotantoa. Taidelasituotanto on perinteisesti melko käsityövaltaista, esimerkiksi useat lasit ja vaasit tuotetaan edelleen puhaltamalla.

Iittalan lasitehtaalla toimii nykyään yhteensä neljä puristelasin konelinjaa. Näistä kolme on yhteydessä yhteen vannauuniin, ja yksi toimii omalla uunillaan. Vaikkakin jokaisessa koneessa on omat ohjelmansa, niiden kaikkien toiminta voidaan kiteyttää yhteensä kuuteen tuotannolle tärkeään vaiheeseen. Nämä ovat lasimassan sulatus, lasimassan tasaaminen, tipan valmistus, tuotteen prässäys, prässätyn tuotteen kiillotus liekittämällä sekä tuotteen jäähtytys. (Tiedonannot 17.2.2011)

Seuraavaksi on esitelty lasin valmistusprosessin eri vaiheet yksitellen.

4.1 Sulatusprosessi

Lasin sulatusprosessi voidaan jakaa yhteensä kolmeen vaiheeseen: sulaminen, puhdistuminen ja kypsyminen. Raaka-ainetta täytetään joko jatkuvatoimisesti sulattavaan nk. vannauuniin tai erissä sulattavaan upokasuuniin. Upokasuunissa mänkiä sulatetaan n. 1400 °C lämpötilassa keskimäärin 6 h. Tämän jälkeen lasimassa puhdistuu 3 h ajan. Lasimassan kypsymiseen kuluu näiden lisäksi aikaa vielä 3h.(Diaesitys,Iittala)



Kuvio 4: Lasin sulamisen perusidea. (http://www.tanaka.co.jp/products-e/image/products1/e/e1_zu2.gif, kuvateksti Noora Vierimaa)

Prosessin alussa seoksen alkaliset aineet alkavat välittömästi hajota. Seurauksena piidioksidi muodostaa eutektisen seoksen n. 800 °C:ssa. Kalkki ja muut perusraaka-aineet alkavat muodostaa liuoksia piidioksidin kanssa.

Piidioksidin ylijäämä alkaa vähitellen liueta, kun sulate tulee kuumemmaksi ja viskositeetti pienenee. Samaan aikaan karbonaatit, hydraatit, nitraatit ja sulfaatit vapauttavat kaasuja. Massassa tapahtuu sekoittumista vapautuvien kaasujen vaikutuksesta, joka edesauttaa massan homogenisoitumista. Myös pintin eli lasinsirun lisäys edesauttaa huomattavasti lasimassan sulamista. Lopullinen sulaminen on toteutunut silloin, kun lasimassasta on poistettu kaikki kaasukuplat.

Suuret kuplat nousevat pintaan paljon nopeammin kuin pienet. Tämä johtuu siitä, että suurilla kaasukuplilla on suurempi noste kuin mitä liikettä vastustava voima on. Kun suuret kaasukuplat yhtyvät samankokoisiin ja pienempiin kupliin, edesauttaa se lasimassan selkiytymistä. Tästä johtuen fuusioreaktio, jossa muodostuu kaasua raaka-aineista, tulisi edetä nopeasti alettuaan. Tämä vaatii nopeaa lämmönsiirtoa, jolloin pyritään pienentämään viskositeettia lasimassan muodostuessa, sekä poistamaan kaasukuplat mahdollisimman nopeasti niiden muodostuttua. Jos sulatus tapahtuu jostain syystä hitaasti, vain suuret kuplat pääsevät poistumaan ja pienet kuplat jäävät seokseen. Ne poistuvat hyvin hitaasti lasimassasta, ja se vaikeuttaa ja pitkittää sulatusprosessia. Sulatuksen tulisi siis tapahtua nopeasti.

Tämän jälkeen lasi on valmista työstettäväksi eri menetelmillä. (Phillips & Pitman 1948, Glass: The Miracle Maker, 154)

4.2 Lasin työstömenetelmät

Kun lasimassa on sulaa ja se on tarpeeksi homogeenista kauttaaltaan, sitä voidaan alkaa työstää eri menetelmillä. Lasille on useita eri työstömenetelmiä, mutta seuraavaksi käsittelyssä ovat taidelasiteollisuudessa eniten käytetyt menetelmät.

4.2.1 Puhaltaminen

Lasin puhaltaminen suupuhalluksella on tehokas tapa sarjatuotannolle. Se on myös lasin työstömenetelmistä vanhin. Iittalan tuotannosta suupuhaltamalla valmistetaan edelleen taide-esineet, linnut, Pro Arte- esineet sekä vuosikuutiot.

Suupuhalluksessa puhaltaja ottaa nk. puhalluspillin päähän pienen määrän lasimassaa, jonka jälkeen siihen puhalletaan ilmakupla. Kun ”postia” on kasvatettu riittävästi, se tavallisimmin puhalletaan erillisen muotin avulla haluttuun muotoon.

4.2.2 Prässäys

Prässäys on tehokas pitkän sarjan tuotantomenetelmä. Sillä mahdollistetaan esineiden erilaiset sisä- ja ulkomuodot. Laseilta vaaditaan markkinoilla jatkuvasti ohuempaa seinämää, ja että se olisi mahdollisimman kevyt. Puristelasia valmistetaan automaattikoneilla, joissa sulaa lasia annostellaan tuotteelle ominainen määrä teräsmuottiin ja puristetaan männän avulla haluttuun muotoon. Koneet annostelevat automaattisesti massan muotteihin, puristavat esineet, jonka jälkeen esineet siirtyvät liekkikiillotukseen. Liekkikiillotuksen avulla poistetaan mahdolliset pinnan epätasaisuudet, sekä saavutetaan haluttu väri ja muoto.

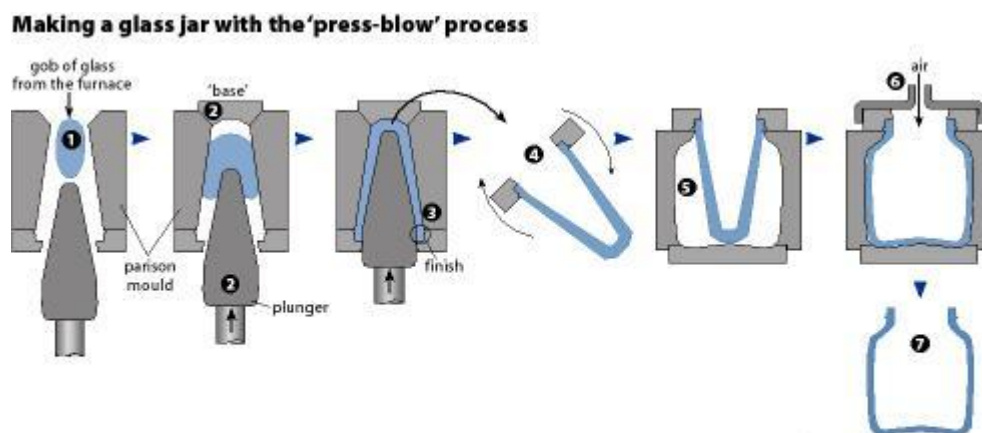
(<http://www.fluent.com/solutions/examples>).

4.2.3 Keskipakovalumenetelmä

Keskipakovalumenetelmässä tippa pudotetaan tippakoneelta teräsmuottiin, jonka jälkeen muokkaus tapahtuu keskipakovoiman aiheuttaman pyörytysliikkeen avulla tai vapaasti jäähdyttäen. Lasimassa levittyy tasaisesti kaikkialle muottiin niin, ettei lasin yläpinta kosketa muita materiaaleja. Näin ollen lasin yläpinnasta tulee kirkas, ja täten menetelmällä voidaan valmistaa esimerkiksi lautasia. (Nuolimaa, Susanna, diplomityö Iittalan lasitehtaalle, 2003)

4.2.4 Puristuspuhallusmenetelmä

Puristuspuhallusmenetelmässä haluttu määrä lasimassaa saatetaan teräsmuottiin aivan kuten keskipakovalumenetelmässä. Lasimassa puristetaan männän avulla haluttuun muotoonsa. Tämän jälkeen lasi puhalletaan lopulliseen muotoon koneiden avulla. Menetelmällä saadaan aikaiseksi hyvin ohutseinämäistä lasia. Tätä prosessia esittää alla oleva kuva.



Kuvio 5: Puristuspuhallusmenetelmä. (<http://www.mgw.in/pnb.htm>), kuvateksti Noora Vierimaa

4.3 Lasin jäähditys ja jälkikäsitely

Lasin muotoilun päätteeksi lasi on jäähdytettävä huolellisesti jännitysten syntymisen estämiseksi. Lasin ulkopinta jäähtyy luonnollisesti nopeammin kuin lasin sisäpinta, jolloin on mahdollista, että ei-toivottuja jännityksiä syntyy. Tällöin lasi voi rikkoutua jopa räjähdysmäisesti.

Tarvittava jäähditys toteutetaan jäähditysuunissa tai jäähdityслиinalla. Nykyään jäähdityслиinoja käytetään uuneja enemmän. Jäähditysuunia käytetään nykyisin suurien lasituotteiden jäähdyttämiseen. Siinä jäähditysuuni lämmitetään noin 500 °C, jonka jälkeen lasia jäähdytetään tietyn ajan riippuen jäähditysohjelman pituudesta. Jäähdityслиinalla sen sijaan lasit liikkuvat eteenpäin liinalla noin kahden tunnin ajan, jonka aikana lasit kuumennetaan myös 500 °C. Tämän jälkeen lasia jäähdytetään tietty aika. (<http://norssi oulu.fi/projektit/6awww/heikkiva/jaahdyt.htm>).

Jälkikäsitelyssä tapahtuvat mm. lasin hiominen, etsaus, hiekkapuhallus, sekä kuuma- ja kylmäkatkaisu. Kun lasi on työstetty muotoonsa, siihen jää ylimääräinen lasikupu päähän, joka tulee poistaa. Se voidaan poistaa heti muotoilun jälkeen lasihytissä (tuotantotiloissa) kuumakatkaisulla, tai jäähditysprosessin jälkeen kylmäkatkaisulla.

Lasi kylmäkatkaistaan tekemällä haluttuun kohtaan lasia viilto. Viiltokohtaa lämmitetään kaasuliekillä, jonka jälkeen prosessia voidaan nopeuttaa altistamalla lasi kylmälle ilmalle. Tällöin lasiin muodostuu jännityksiä, jonka seurauksena lasikupu irtoaa viillon kohdalta. Katkaisun jälkeen lasin reuna on hyvin terävä ja se pyöristetään. Hiomisen jälkeen reunaa täytyy vielä muotoilla pyöreämpään muotoon sulattamalla tai kiillottamalla reunaa. Lasia voidaan myös tarvittaessa sahata tai hioa lisää.

Lasi hiekkapuhalletaan usein, jotta saataisiin aikaiseksi matta tai kuviollinen pinta. Etsaus tapahtuu siihen tarkoitettuun ammeeseen, jossa on usein fluorivetyhappoa. On olemassa valmista pulveria, joka sisältää etsalttia ja bariumsulfaattia. Siihen täytyy lisätä vettä ja suolahappoa, jotta saadaan ainetta mattakäsittelyyn. Suolahappo vapauttaa fluorivetyä, jonka johdosta lasin pinnasta tulee matta. Nämä hapot ovat kuitenkin vaarallisia käsitellä, joten se vaatii erityishuomiota prosessin toteuttamiseksi. (Boken om glas, 160-164)

Hiekkapuhaltamalla saadaan aikaiseksi lasin pintaan myös mattapinta. Siinä ammutaan suurella paineella esimerkiksi hiekkaa tai alumiinioksidia lasin pintaan. Käsittelyssä lasin pinta rikkoutuu, jonka tuloksena saadaan harmahtava mattaus kirkkaassa lasissa.

4.3.1 Temperoitu lasi

Temperoitu lasi on tarkoitettu kestävämpään tavallista enemmän sekä lämpö- että mekaanisia shokkeja. Lasia on kovetettu lämmittämällä sitä lähelle lasin pehmenemispistettä ja sitten jäädytetty se nopeasti. Täten lasin ulkopinta jäähtyy ja kutistuu hieman sisustan vielä ollessa suhteellisen kuuma. Kun sisusta vastaavasti kutistuu, ulkopinta jäykistyy ja joutuu suuren paineen alaiseksi.

Temperoitu lasi on monta kertaa kestävämpää kuin normaali hehkutettu lasi. Se kestää siihen kohdistuvia iskuja erittäin hyvin, ja rikkoutuessaan se hajoaa sille tyypillisellä tavalla pieniksi mureniksi. (George W. McLellan, Errol B. Shand, Glass Engineering Handbook, 1958, 12-2)



Kuvio 6: Kuva temperoidun lasin rikkoutumistyylistä. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

5 Teoriaa iskunkestävyydestä

Lasiin iskunkestävyyttä voidaan mitata siihen tarkoitetuilla reunaniskulaitteilla.

Tutkimuksissa pyritään selvittämään lasiin kohdistuvan iskuenergian suuruus lasin rikkoutumishetkellä. Testilasia isketään erilaisilla vasaroilla joko eri kohtiin tai kohdistamalla isku aina samaan pisteeseen. Täten iskuenergia joko jakautuu eri pisteisiin tai kulminoituu tiettyyn pisteeseen lasiesinettä.

Lasin iskunkestävyyttä määritettäessä siihen vaikuttavat eri suureet. Suureiden m , h , l , α sekä v väliset riippuvuudet on esitetty seuraavissa kaavoissa.

Potentiaali- ja kineettisen energian kaavojen välinen riippuvuus:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

$$E = mgh \quad (3)$$

$$E = mgl(1 - \cos \alpha)$$

$$\cos \alpha = \frac{l-h}{l} = 1 - \frac{h}{l}$$

$$\frac{h}{l} = 1 - \cos \alpha$$

$$h = l(1 - \cos \alpha) \quad (4)$$

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)} \quad (5)$$

missä

E on iskuenergia (J)

m on heilurin ja vasaran yhteismassa (kg)

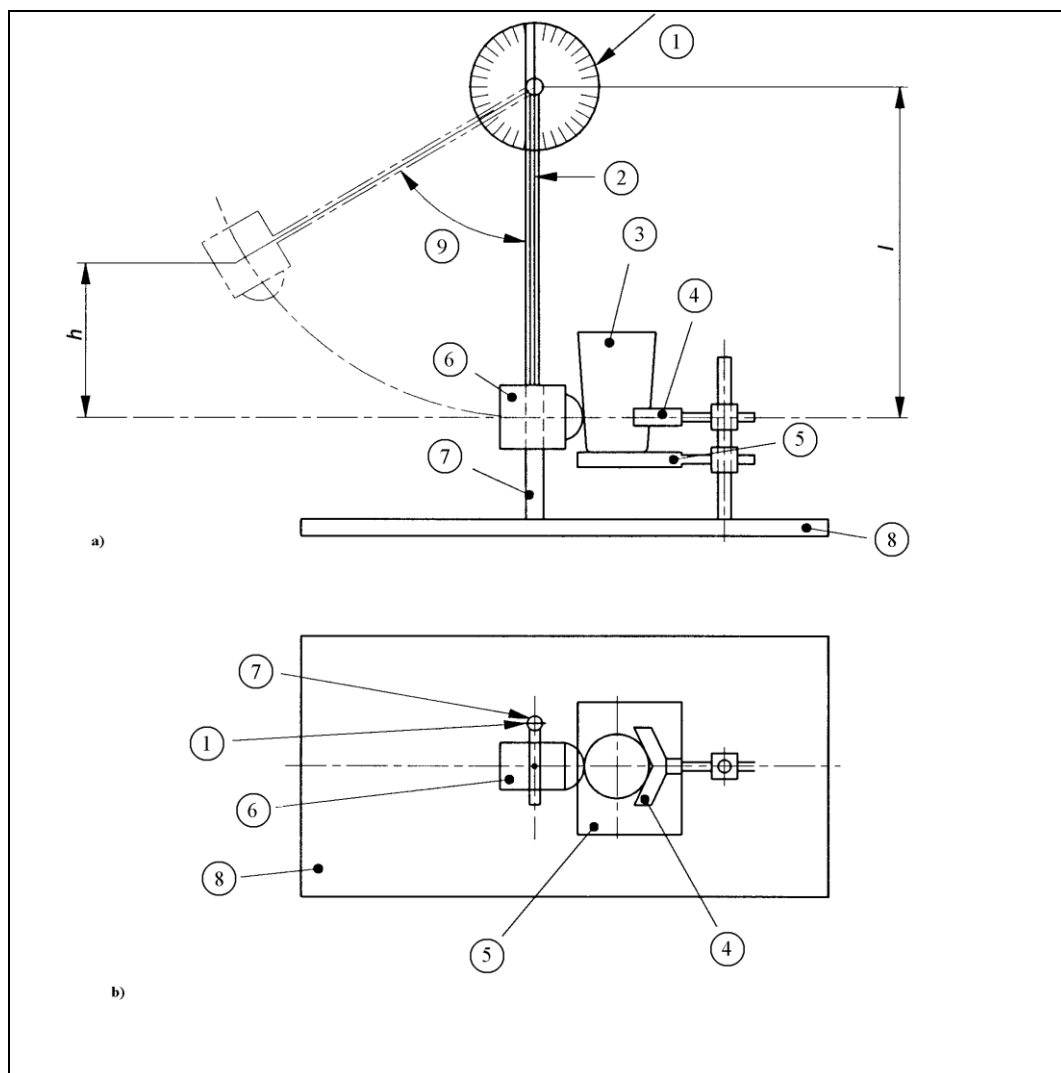
g on gravitaatiovakio (m/s^2)

h on heilurin pudotuskorkeus (m)

l on heilurin varren pituus (m)

α on heilurin muodostama kulma tasapainoasentoon nähden ($^\circ$)

v on heilurin putoamisnopeus (m/s)



- a) Sivunäkymä
- b) Näkymä ylhäältä
- 1 Kulma-asteikko
- 2 Heilurin varsi
- 3 Testattava tuote
- 4 Tukirakenne
- 5 Tukirakenne
- 6 Vasara
- 7 Tukirakenne
- 8 Alusta
- 9 Kulma-aste

Kuvio 7: Iskunkestävyyden mittaamiseen tarkoitettun laitteiston periaatekuva. (Kuva SFS-EN 12980, kuvateksti Noora Vierimaa)

6 Ohjeistus lasin iskunkestävyyden testaamiselle

Seuraavaksi on laadittu työohjeet lasituotteiden testaamista varten Arabian tehtaalla sijaitsevalle mittauslaitteistolle. Jokaisen lasin kohdalla käytäntö on hieman erilainen, jonka takia laitteisto vaatii hienovaraista säätöä jokaisen lasituotteen mukaisesti.

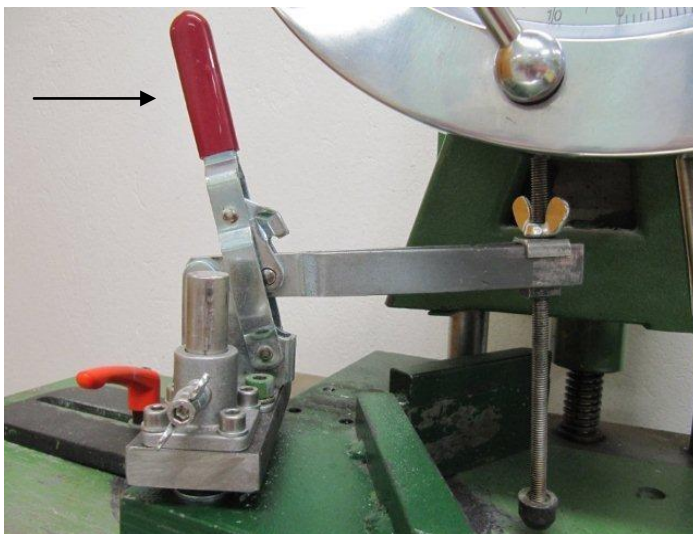
Tämän testimenetelmän tulokset riippuvat paljolti testiolosuhteista. Tästä syystä tuloksia ei voi yleistää muihin mittauslaitteistoihin eikä testiolosuhteisiin. Tulokset ovat päteviä vain kokeessa testatuille tuotteille.

6.1 Mittauslaitteiston rakenne ja toiminta

Menetelmässä käytetään iskunkestävyyden mittaamiseen tarkoitettua laitetta, jota on aiemmin käytetty lähinnä posliinituotteiden testaamiseen. Siinä esine asetetaan haluttuun korkeuteen ja asentoon tuettuna mittauslaitteiston tukirakenteisiin (numero 4, 5 ja 8, kuvio 5). Esine altistetaan heilurin päässä olevan vasaran lyönnille, jonka massa m tunnetaan (numero 6, kuvio 5). Heilurin massa on merkityksetön, mutta sen pituus l tunnetaan (numero 2, kuvio 5). Heiluri asetetaan haluttuun kulmaan α (numero 9, kuvio 5) sekä tietylle korkeudelle h . Heilurin annetaan pudota vapaasti nopeudella v . Heiluri riippuu kulma-asteikolla varustetusta kiekosta (numero 1, kuvio 5), joka on puolestaan kiinnitetty laitteen tukirakenteisiin. Tukirakenteet on rakennettu niin, että testattava tuote sijoitetaan muodoltaan kiilamaiseen paikkaan. Kiilan paikka on säädettävissä vivun avulla, jolloin se saadaan kiristämällä haluttuun kohtaan. Lasituote kiinnitetään tukevasti tukirakenteisiin siihen tarkoitettun kiinnitysvivun avulla, jossa on irrotettava kumipää. Tukirakenteen korkeutta pystytään myös tarvittaessa säätämään. Ohessa on esitetty kuvia mittauslaitteistosta.



Kuvio 8: Iskunkestävyyden mittauslaite (Kuva: Anna von Hellens, kuvateksti Noora Vierimaa)

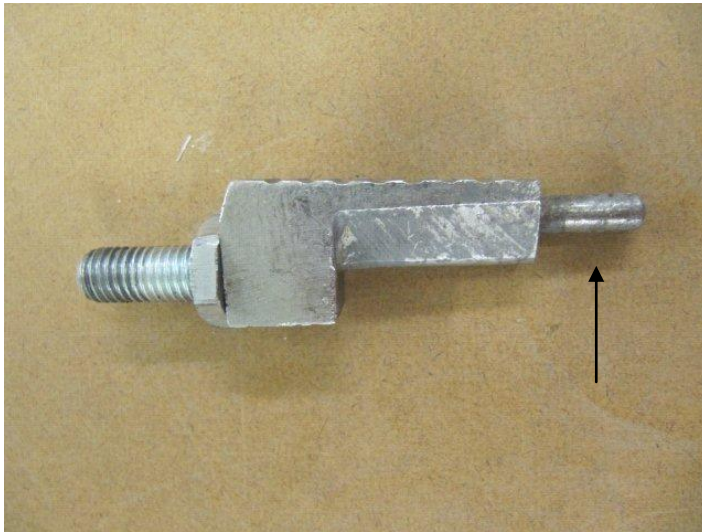


Kuvio 9: Kiinnitysvipu, jolla kiinnitetään testattava lasiesine mittauslaitteistoon. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

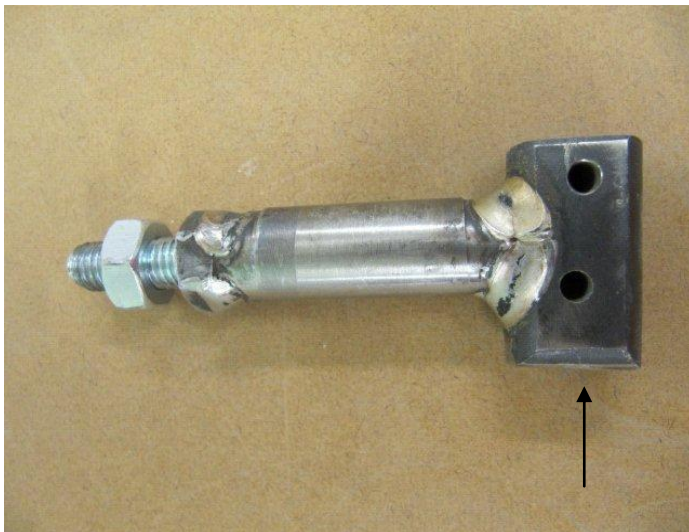


Kuvio 10: Korkeutta voidaan säätää kuvassa näkyvällä vivulla kiertämällä sitä haluttuun suuntaan.(Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

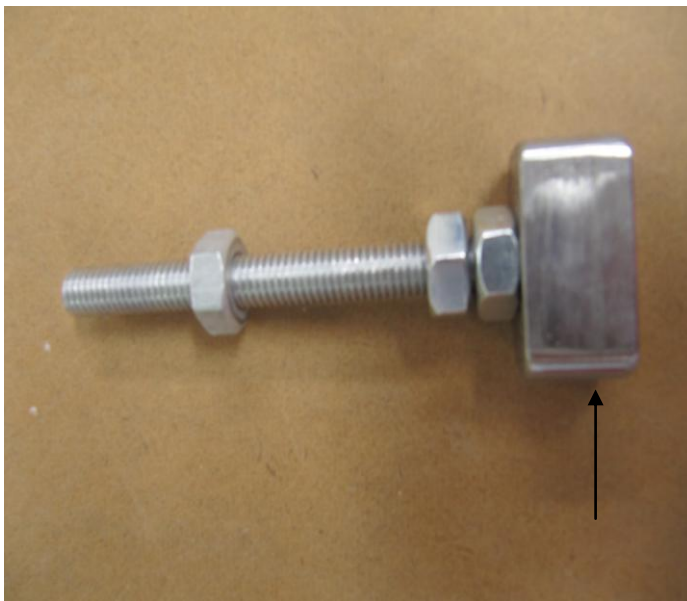
Heiluri toimii iskunvälittäjänä laitteistossa. Se on tietyn pituinen, ja siihen on vaihdettavia iskupäitä 3 kpl. Iskupäät ovat painoiltaan hyvin erilaiset, ja niiden iskukohdat ovat muodoiltaan erilaiset. Painavampaa iskupäätä on hyvä käyttää lasituotteissa, joiden reunamapaksuus on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi juomalasiin reunamapaksuus. Painoltaan pienempi iskupää puolestaan soveltuu hyvin esimerkiksi juomalasiin testaukseen. Iskukohdan korkeutta on myös helppo säätää siihen tarkoitettuun vivun (kuvio 8) avulla. Iskupäistä ja säätövivusta on esitetty havainnollistavat kuvat.



Kuvio 11: Iskupää 1 Soveltuu hyvin esimerkiksi juomalaseille. Nuolen osoittama kohta on vasaran kontaktikohta lasituotteeseen iskuhetkellä. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 12: Iskupää 2 Soveltuu hyvin tuotteille, joilla on suurempi reunanpaksuus. Nuolen osoittama kohta on vasaran kontaktikohta lasituotteeseen iskuhetkellä. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 13: Iskupää 3 soveltuu hyvin esimerkiksi prässättyjen juomalasiin testaukseen. Nuolen osoittama kohta on vasaran kontaktikohta lasituotteeseen iskuhetkellä. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

Mitta-asteikko muodostuu kulma-asteikolla varustetusta kiekosta, joka on kiinnitetty laitteen tukirakenteisiin. Kulmaa voi säätää kahden vivun avulla aina 0° :sta maksimiin eli 145° :een.



Kuvio 14: Mitta-asteikko. Nuolilla on merkitty vivut, joiden avulla säädetään mitta-asteikkoa haluttuun astelukemaan. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

6.2 Alkutoimenpiteet

Aluksi tuotteista on hyvä mitata seinämävahvuudet useammasta eri paikasta. Digitaalinen työntömitta on tähän tarkoitukseen hyvä ja luotettava apuväline. Tuotteet on myös hyvä punnita mahdollisia jälkitoimia varten.

6.3 Koemenetelmä

Ennen mittauksen aloittamista tulee päättää, millaista vasaraa kyseiselle lasituotteelle aiotaan käyttää. Vasara saadaan helposti pois ja paikoilleen kiertämällä sitä ruuvimaisesti. Vasaran valinnan jälkeen lasituote asetetaan kiilaan, jolloin nähdään, tarvitseeko kiilan paikkaa muuttaa. Kiila kiinnitetään siihen pisteeseen, jossa heiluri vapaasti ollessaan 0-pisteessä eli ala-asennossa ei aivan osu lasin reunaan. Iskukohta määritetään halutusti lasikohtaisesti. Vasaran iskukohtaa säädetään väkipyörän avulla oikeaan korkeuteen. Myös lasituotteen kiinnitysvipu säädetään oikealle korkeudelle.

Lasituote tulee olla niin lujasti kiinnitettynä laitteen tukirakenteisiin, ettei se liikahta vasaran iskiessä. Tämän estämiseksi voidaan käyttää apuna vielä esimerkiksi sinitarraa, jonka avulla tuote pysyy entistäkin paremmin paikoillaan.

6.4 Iskeminen

Isku kohdistetaan esineeseen sen muodosta riippuen aivan yläkulmaan eli ns. skoolauskulmaan tai muutama millimetri reunan alapuolelle. Iskukulmaa aletaan kasvattaa siten, että ensimmäinen isku isketään esineeseen 10° kulmasta. Tämän jälkeen iskukulmaa kasvatetaan 5° välein, kunnes lasituotteesta irtoaa palanen tai se hajoaa täysin. Isku kohdistetaan samaan kohtaan jokaisella iskukerralla, eikä tuote saa iskujen välillä liikahtaa.

6.5 Tulosten tarkastelu

Mittaustuloksena saadaan iskunkestävyyttä kuvaava iskuenergia, joka on kohdistunut hajoamishetkellä lasituotteeseen. Mittayksikkönä toimii Joule (J). Tulokset syötetään kaavaan, joka pätee vain kyseiselle laitteistolle Arabian laboratoriossa. Kaavassa on otettu huomioon mm. iskunarrelle ominainen painopiste, heilurin ja vasaran yhteismassa sekä iskukulma.

Tuloksiin vaikuttavat monet eri tekijät mittauskokeiden aikana. Tuloksia ei voi siis verrata toisenlaisten testausten (esimerkiksi toisella laitteella tehtyjen) vastaaviin tuloksiin eikä myöskään yleistää samasta materiaalista valmistettuihin toisenlaisiin tuotteisiin. Tulokset pätevät vain tutkittaviin näytteisiin sekä ko. koejärjestelyille. Tuloksiin vaikuttavat voimakkaasti esimerkiksi riittävä tuennan saavuttaminen; jos tuenta ei ole riittävä, isku ei kohdistu aina samaan kohtaan, mikä aiheuttaa tuloksissa epäluotettavuutta. Vasaran asennosta pitää myös huolehtia, ettei se pääse kääntymään iskujen välillä. Tämän työn mittauksissa käytettävää vasaraa ei saanut niin kireälle, ettei se kuitenkin olisi päässyt kääntymään jonkin verran iskujen välillä.

Kiinnitysvipu tulee säätää myös niin kireälle, että lasituote olisi mahdollisimman voimakkaasti tuettuna tukirakenteisiin. Lasituotteen pitää olla tukevasti kiinni kiilassa, jotta se ei pääsisi liikkumaan siihen iskettäessä.

Mitä suurempi iskuenergia saadaan tulokseksi, sitä kestävämpi lasituote on. Jos mittauksissa on käytetty liian suurta vasaraa niin, että jokainen lasi on särkynyt täydellisesti, vasara on ollut liian painava. Myös liian kevyen vasaran käyttö johtaa siihen, etteivät mittaustulokset ole vertailukelpoisia muiden tulosten kanssa. Vasara tulee valita tarkkaan käyttökohteen mukaan.

7 Testilasien tulosten tarkastelu

Testisarjoja oli yhteensä 29, joista kahdessa sarjassa testattiin 20 kpl testilaseja ja lopuissa 10 kpl. Laitteistoa jouduttiin modifioimaan testauksia varten, jotta lasituotteiden kiinnitys laitteistoon oli mahdollista. Mittauksista suurin osa suoritettiin käyttäen kevyempää vasaraa. Osa testilaseista testattiin vertailukelpoisten tulosten saamiseksi myös painavammalla vasaralla. Yksi paksuseinäisimmistä tuotteista testattiin pelkästään painavammalla vasaralla tuotteen seinämäpaksuuden vuoksi. Täten samankaltaisten tuotteiden tulokset olivat verrattavissa toisiinsa.

Testattavat tuotteet oli valittu niin, että saataisiin tuloksia monipuolisesti eri menetelmillä valmistetuista laseista. Joukossa oli niin suupuhallettuja, prässättyjä, temperoituja kuin myös kuuma- ja kylmäkatkaistuja tuotteita. Eri lasityypit nimetään jatkossa kirjaimilla A₁, A₂, B₁, B₂, B₃, C, D, E, F jne.

7.1 Suupuhalletut lasit (A₁, A₂, B₁, B₂, B₃, C, D, E, F)

Testisarjojen laseista osa oli valmistettu suupuhaltamalla. Tällöin saadaan aikaan ohuempi seinämävahvuus kuin vastaavilla tuotteilla, jotka on valmistettu konelinjalla.

Seinämävahvuuksissa oli havaittavissa huomattavia eroja. Myös lasien painoissa oli suuria keskihajontoja. Sarjat A₁ ja B₁ olivat reunamavahvuudeltaan pienempiä kuin sarjat A₂ ja B₂. Vaikka sarjojen A₁ ja B₁ reunamavahvuuksien keskiarvot eivät olleet toleranssin määäämissä rajoissa, ne rikkoutuivat lähes samoissa astelukemissa kuin sarjat A₂ ja B₂. Sarja B₃ puolestaan kesti iskuja paremmin kuin em. sarjat. Tämä voi johtua siitä, että B₃-sarjalla oli suurempi reunamavahvuus.

Lasituote C oli reunamavahvuudeltaan tasainen. Painon keskihajonta sen sijaan oli melko suuri. Lasi saatiin kiinnitettyä moitteettomasti mittauslaitteistoon. Lasituote kesti iskuja vaihtelevasti. Osa laseista ei rikkoutunut ollenkaan, osa sen sijaan rikkoutui melko suurissa asteluvuissa. Kyseinen tuote oli katkaistu kuumakatkaisu-menetelmällä, mikä voi selittää tapahtuman. Kuumakatkaisulla saadaan poistettua jännitykset lasin yläreunasta paremmin kuin kylmäkatkaisu-menetelmällä. Tällöin lasissa ei ole turhia jännityksiä, jotka johtavat helposti lasin rikkoutumiseen.

Sarjan D kohdalla esiintyi ongelmia lasien kiinnityksen suhteen. Lasin jalan muodon takia jalkaa ei saatu kunnolla tuetuksi, mistä johtuen tulokset eivät ole välttämättä täysin luotettavat kyseisen tuotteen kohdalla. Lasituotteiden painojen välillä esiintyi varsin suurta keskihajontaa. Reunamavahvuuden keskihajonta oli sitä vastoin pieni. Tuote kesti iskuja varsin hyvin. Kymmenestä testilasista yksi ei rikkoutunut. Testilaseista lähes jokainen lasi noudatti samaa rikkoutumistyyliä.

Sarjan E ulkoisesta muodosta johtuen myös sen kiinnitys mittauslaitteistoon aiheutti ongelmia. Lisäapuna kiinnityksessä käytettiin sinitarraa, jolla varmistettiin lasin liikkumattomuus iskujen välillä. Laseja ei sinitarran avulla saatu tuetuksi riittävän tiukasti mittauslaitteistoon, mistä johtuen mittaustulokset eivät välttämättä ole täysin luotettavat. Iskukohta kohdistettiin lasin muodosta johtuen 2mm yläreunan alapuolelle. Testilasin reunanvahvuuksien keskihajonta oli hyvin mitätön. Myöskään testilasiain painojen keskihajonnassa ei ollut huomattavia eroja muihin tuotteisiin nähden. Lasi kesti iskuja vaihtelevasti.

Sarja F oli reunanvahvuudeltaan ja painoltaan hyvin tasainen. Lasituote saatiin tuettua hyvin testilaitteistoon. Lasituote rikkoutui lähes poikkeuksetta siten, että iskukohtaan nähden sen molemmiin puolin yläsivut rikkoutuivat. Tämän lisäksi iskukohdasta lähti säröjä ympäri lasia. Lasituote kesti iskuja vaihtelevasti. Osa lasituotteista rikkoutui vasta hyvin voimakkaasta iskusta, kun taas toiset lasit rikkoutuivat melko pienillä asteluvuilla.

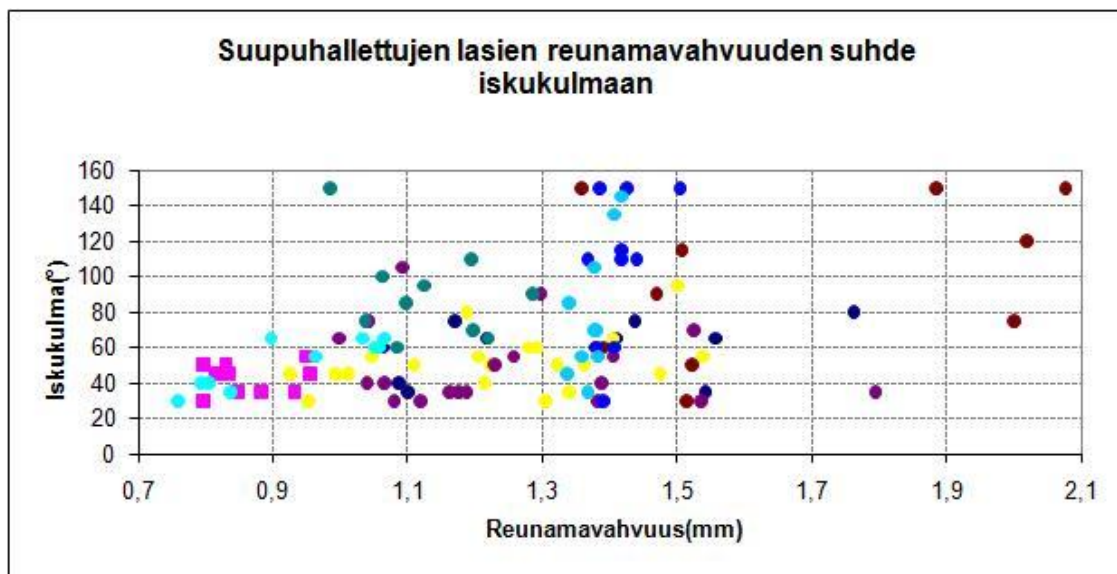
Ohessa on muutama kuva lasien tyypillisistä rikkoutumistyyleistä. Lisäksi kaaviossa on esitetty suupuhallettujen lasien reunamavahvuuksien suhde iskukulmaan tuotteiden rikkoutumishetkellä.



Kuvio 15: Tyypillinen kuva suupuhallettujen lasien rikkoutumistyylistä. Kuvan lasi on rikkoutunut lähes täysin. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



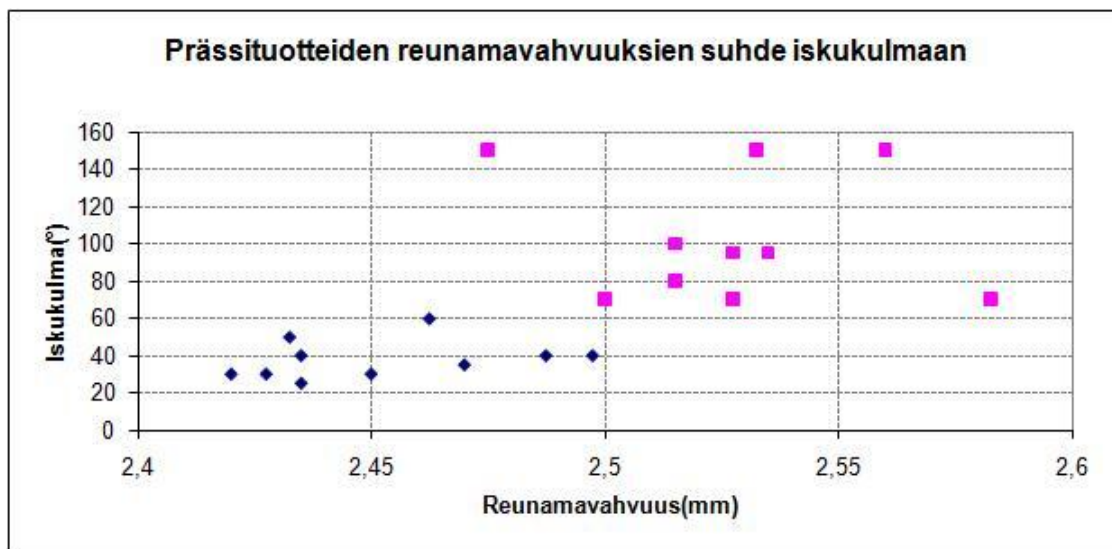
Kuvio 16: Tyypillinen kuva suupuhallettujen lasien rikkoutumistyylistä. Kuvasta voidaan havaita usealle lasille tyypillinen rikkoutumistyyli; reunat hajosivat lähes täysin. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 17: Suupuhallettujen lasien reunamavahvuuden suhde iskukulmaan rikkoutumishetkellä. Kuten kaaviosta huomaa, tulokset vaihtelivat suuresti tuotteiden välillä. Eri värit kuvastavat eri tuotesarjoja. Sarjoissa oli sekä värillisiä että kirkkaita, eri vahvuisia, sekä eri menetelmillä valmistettuja lasia. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

7.2 Prässituotteet (G, H, I, J, K)

Sarja G oli valmistettu konelinjalla prässimenetelmällä. Reunamavahvuus oli suurempi kuin suupuhalletuilla vastaavilla tuotteilla, mutta keskihajonta reunamavahvuuksien välillä samaa luokkaa. Keskihajonta testilasien painojen välillä ei ollut suuri. Sarja kesti iskuja melko hyvin. Kymmenestä testilasista kolme ei rikkoutunut ollenkaan käytettäessä kevyempää vasaraa. Seitsemän lasia rikkoutui melko suurissa kulmalukemissa. Lasin rikkoutumistyyli noudatti lähes kaikkien lasien kohdalla samaa linjaa; lasin iskukohtaan nähden sen molemminpuoleiset yläsivut rikkoutuivat. Sama tuote harmaana testattiin käyttäen painavampaa vasaraa. Tuloksena saatiin suuri ero sarjojen iskulujuuksien välille. Tästä voidaan päätellä, että luotettavien tulosten saamiseksi tulisi käyttää vasaraa, joka olisi painoltaan ko. vasaroiden välistä.



Kuvio 18: Kaavion sarjat on testattu käyttäen sekä painavampaa, että kevyempää vasaraa. Tuloksista huomaa, että painavamman vasaran käyttö vähensi tulosten hajontaa. Eri värit kuvastavat eri tuotesarjoja. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

Sarja H oli reunanpaksuudeltaan ja painoltaan melko tasainen. Tuotetta testattiin käyttämällä kevyempää vasaraa. Lähes jokainen sarjan tuote hajosi samalla tavalla.

Sarjan I reunapaksuuden keskihajonta oli erittäin pieni. Tuote oli myös painoltaan tasainen. Kymmenestä testilasista vain kaksi lasia rikkoutui käytettäessä kevyempää vasaraa. Nämä lasit hajosivat yläreunasta sekä iskukohdasta. Tuote kesti iskuja todella hyvin, ja kaksi rikkoutunutta lasia hajosi suurissa astelukemissa. Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi kyseiset lasit testattiin lisäksi käyttämällä painavampaa vasaraa. Sarjojen iskulujuuksien välille tuli suuret erot, josta voidaan päätellä, että luotettavampia tuloksia saataisiin käyttämällä hieman kevyempää vasaraa.

Sarja J oli reunamavahvuudeltaan ja painoltaan melko tasainen. Lasituote ei rikkoutunut helposti; vain kaksi lasia kymmenestä meni rikki käyttämällä painavampaa vasaraa. Nämä kaksi lasia hajosivat tuottamatta suurta määrää lasinsiruja. Kyseiset lasit hajosivat iskukohdasta sekä iskukohtaan nähden sen sivuilta. Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi kyseiset lasit testattiin käyttämällä painavampaa vasaraa. Myös näiden sarjojen iskulujuuksien välille tuli suuret erot.

Sarja K oli reunanpaksuudeltaan tasainen. Painon keskihajonta oli huomattavan pieni. Tuote oli temperoitua eli lämpökäsiteltyä lasia, jonka tulisi kestää iskuja huomattavasti paremmin kuin muut vastaavat lasit. Kymmenen lasin sarjasta vain yksi lasi hajosi käytettäessä kevyempää iskupäätä. Tuote hajosi karkaistun lasin tapaan aivan pieniksi mureniksi. Muut lasit kestivät iskuja maksimiin asti hajoamatta. Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi kyseiset lasit testattiin lisäksi käyttämällä painavampaa vasaraa. Kyseistä vasaraa käytettäessä kaikki lasit hajosivat. Kolme lasia kesti iskuja korkeisiin astelukemiin, kun taas loput lasit hajosivat suhteellisen alhaisissa astelukemissa. Luotettavimmat tulokset voitaisiin saavuttaa käyttämällä kokeissa iskupäätä, joka olisi painavampi kuin pieni vasara mutta kevyempi kuin painavampi vasara.

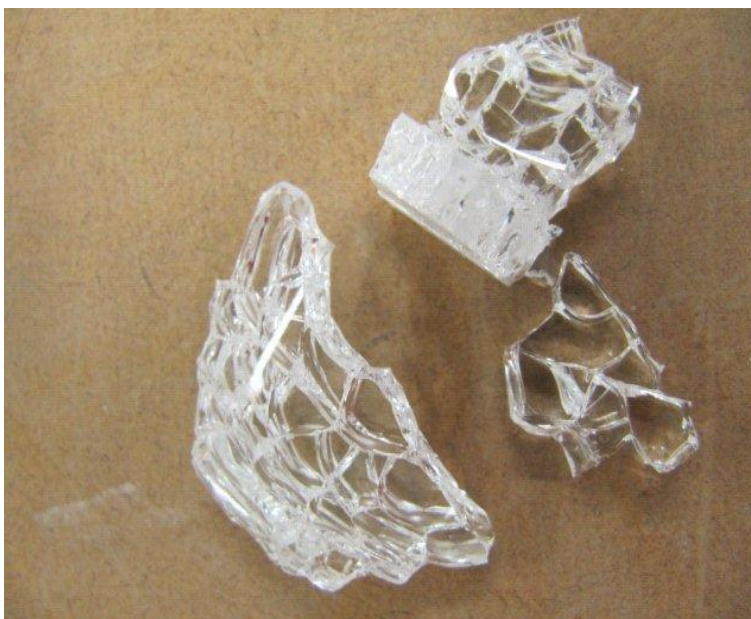
Ohessa on esitetty vielä muutamia kuvia prässituotteiden tyypillisistä rikkoutumistyyleistä.



Kuvio 19: Lasin tyypillinen rikkoutumistyyli.(Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 20: Lasin tyypillinen kolmiomainen rikkoutumistyyli. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 21: Temperoidun lasin tyypillinen rikkoutumistyyli. Lasituote hajoaa pieneksi murenaksi, mutta ei muodosta teräviä reunoja. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

7.3 Prässituotteet (L ja M)

Tuotteet testattiin käyttäen painavampaa vasaraa. Tuotteiden kannet kestivät iskuja suuremmista astelukemista kuin tuotteiden pohjat. Tämä johtuu tuotteiden välisistä reunamapaksuuseroista. Tuotteiden kannet rikkoutuivat niin, että lähes jokainen rikkoutui pohjaa myöten täysin. Sitä vastoin tuotteiden pohjia isketessä vasaran iskukohdasta lähti pala pois.



Kuvio 22: Tyypillinen kuva pohjan rikkoutumisesta. Vasaran iskukohdasta on lohjennut pala pois. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 23: Tuotteen kannen rikkoutumiskuva. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

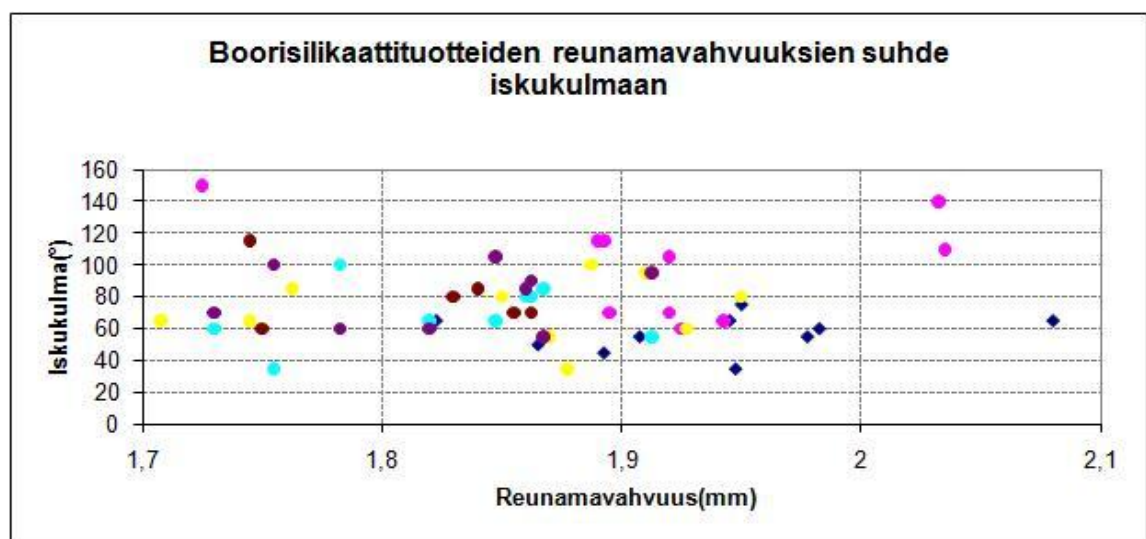
7.4 Boorisilikaattilasit (N, O, P)

Lasituote oli reunanvahvuudeltaan ja painoltaan melko tasainen. Lasituotetta kiinnitettäessä mittauslaitteistoon ilmeni sen kiinnityksen kanssa ongelmia. Muutama lasi rikkoutui lähes täysin jo kiinnitysvaiheessa. Yksi lasista rikkoutui lähes räjähdysmäisesti.

Lasituotteen iskukohdan molemmilta puolilta halkesivat reunat lähes jokaisen lasin kohdalla. Tämän lisäksi usea lasi hajosi etureunasta lähes täydellisesti. Testilasit kestivät iskuja erittäin vaihtelevasti. Puolet lasista kesti iskuja hyvin, kun taas puolet hajosi jo varsin pienissä asteluvuissa.

Kyseisen lasituotteen voisi olettaa kestävän iskuja paremmin, koska lasit on valmistettu boorisilikaattilasista. Tästä syystä kyseisillä lasilla teetettiin lisätestejä. Laseille suoritettiin ennen uusia mittauksia lämpökäsittely, jolla pyrittiin poistamaan lasissa olevia jännityksiä.

Lämpökäsittelyn jälkeen lasit kestivät iskuja edelleen vaihtelevasti. Osa lasista hajosi jälleen jo kiinnitysvaiheessa. Tästä syystä laseja ei saatu kiinnitettyä mittauslaitteistoon niin tukevasti kuin olisi pitänyt, ja laseja yritettiin tukea sinitarralla. Laseja testattiin myös painavammalla vasaralla. Lasit kestivät iskuja melko hyvin, mutta hajosivat jälleen lähes täydellisesti. Kahdelle eri koolle teetettiin lisäkoeket myös kevyemmällä vasaralla, jolloin saatiin jälleen vaihtelevia tuloksia. Ohessa on esitetty tyypillinen kuva lasien rikkoutumistyylistä.



Kuvio 24: Boorisilikaattituotteiden reunamavahvuuden suhde iskukulmaan rikkoutumishetkellä. Kuten kaaviosta huomaa, tulokset vaihtelivat suuresti tuotteiden välillä. Eri värit kuvastavat eri kokoisia laseja. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 25: Boorisilikaattilasien tyypillinen rikkoutumistyyli. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)



Kuvio 26: Borosilikaatin tyypillinen rikkoutumistyyli. Suurin osa rikkoutui kuvassa näkyvällä tavalla siten, että vain pohja jäi jäljelle. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

7.5 Prässituotteet Q ja R

Koska välimallin vasaralle oli aiempien mittaustulosten perusteella tarvetta, se toteutettiin ja kyseistä vasaraa käyttäen testattiin vielä muutama prässituotesarja. Lisätestausten avulla pyrittiin myös selvittämään, jäähdyttääkö jäähdytysliina lasituotteita epätasaisesti, ja onko lasin sijainnilla jäähdytysliinalla merkitystä lasin iskunkestävyyteen.

Testauksissa mitattiin kahdella eri prässikoneella valmistettujen tuotteiden iskunkestävyyksiä. Liinoilta oli otettu sarjat liinan keskiosasta ja sekä liinan vasemmalta että oikealta puolelta. Mittaustuloksissa ei ilmennyt merkittäviä poikkeuksia muihin prässituotteisiin nähden.



Kuvio 27: Tyypillinen rikkoutumistyyli kyseisille tuotteille. (Kuva ja kuvateksti Noora Vierimaa)

8 Yhteenveto

Kuten jo aiemmin todettiin, lasien iskunkestävyyteen vaikuttavat monet asiat. Työssä testattiin monia erimuotoisia tuotteita. Tuloksista ja rikkoutumistyyleistä voidaan havaita, että kartiotyypistä poikkeavat lasit kestivät iskuja hieman paremmin. Rikkoutumismalli noudatti kuitenkin kaikilla tuotteilla samaa kaavaa. Kuvissa on havaittavissa kolmiomaisia rikkoutumismalleja, sekä täydellisiä hajoamisia. Tuloksissa esiintyi kuitenkin niin suurta hajontaa, että johtopäätöksiä ei voida verrata muihin vastaaviin testeihin.

Myös tuotteiden valmistusmenetelmät voivat vaikuttaa reunamaiskunkestävyyteen. Suupuhalletun lasituotteen seinämäpaksuus voi vaihdella suuresti, kun paksuutta mitataan tuotteen eri kohdista. Prässituotteiden kohdalla tuotteet ovat melko tasaisia seinämäpaksuudeltaan.

Lasimassan valmistusprosessissa syntyy mänkiin pieniä ilmakuplia kemiallisten reaktioiden takia. Jos kuplia ei saada täysin poistettua lasimassasta, eli massa on ikään kuin raakaa, kuplat jäävät myös valmiiseen tuotteeseen. Ilmakuplia voi syntyä myös lasin liekkikiillotuksessa, jolloin kiillotus liekki on liian kuuma tai sen etäisyys tuotteeseen liian pieni. Nämä kuplat eivät välttämättä yksistään aiheuta lasin helpompaa rikkoutumista, mutta saattavat edesauttaa tätä yhdessä muiden pienten laseissa esiintyvien vikojen kanssa. Lähes kaikissa lasituotteissa esiintyy lasimassasta johtuvia pieniä vikoja, mutta niitä ei voida havaita paljain silmin. Aiemmissa vastaavanlaisissa tutkimuksissa käytettiin mikroskooppeja, jotka suurentavat tuotteen koon 150-kertaiseksi. Lasin vikoja voivat olla esimerkiksi kivet eli sulamaton lasin raaka-aine tai uunikivi, paininmuotin jäljet lasituotteessa, pienet ilmakuplat, sekä epätasaisuudet lasimassassa.

Iittalan aiemmin teetetystä testistä ilmeni, että lasin lohkeaminen oli saanut alkunsa paikasta, jossa havaittiin ilmakuplia tuotannon jäljiltä. Nyt laseja ei tutkittu mikroskooppien avulla, mutta voidaan olettaa, että myös näissä testilaseissa lohkeaminen alkoi monen tuotteen kohdalla juuri ilmakuplien lähettyviltä.

Jälkikäsitteilyllä voi myös olla vaikutusta lasien iskunkestävyyteen. Tuotteista yksi oli kuumakatkaisu, ja se kesti iskuja melko hyvin pantamaisen reunansa vuoksi.

Jäähdytysuunin lämmönjakautumisellakin voi olla suuri merkitys lasien jäähtymiseen ja sitä kautta iskunkestävyyteen. Jos lasit jäähtyvät epätasaisesti, niihin jää jännityksiä. Jäähdytysuunin lämmönjakautumista tulisi seurata vastaisuudessa, ja saada se jäähdyttämään tuotteita mahdollisimman tasaisesti.

Jotta Iittalan lasitehtaalle olisi jatkossa enemmän hyötyä reunaniskunkestävyyksmittauksista, olisi helpompaa, jos tehtaalla olisi oma kyseisiin mittauksiin tarkoitettu laitteisto käytettävissä. Iskupäitä voitaisiin teettää useita erimallisia ja -kokoisia. Tuotteiden kiinnitykseen voitaisiin perehtyä enemmän, ja muuttaa laitteistoa sen mukaan. Nyt lasit testataan Helsingissä, johon lasit täytyy lähettää erikseen. Myös lasijätteen hävittäminen Arabian tehtailla on ongelmallista, koska he itse eivät pysty lasijätettä hyödyntämään tuotannossaan. Täten lasijätteet tulee aina lähettää erikseen takaisin Iittalaan. Tuotteiden iskunkestävyyden testauksia voisi jatkossa laajentaa suurempiin testieriin yhtä tuotetta kohden, jolloin saataisiin myös käsitys siitä, miten suuri hajonta on suurelle testijoukolle. Lasituotteita voisi myös testata tuotannon yhteydessä, mikä puolestaan vaatisi lisää aikaa tuotannon työntekijöille.

8.2 Itsearviointia

Koko opinnäytetyöni voin jakaa Arabian tehtailla Helsingissä tehtyyn tutkimusosioon sekä itsenäisesti suoritettuun työn raportointiin. Arabian tehtailla prosessiin käytetty aika oli tiiviisti työskentelyä niinä päivinä, jolloin testauksia suoritettiin. Periaatteessa opinnäytetyön tulisi olla valmis kahden ja puolen kuukauden kuluttua käyttäessä normaalia työviikkoa. Työhön ei kulunut työtunnillisesti aivan kyseistä aikaa, mutta lähestulkoon. Testausten ja raportoinnin välillä en ole pitänyt taukoja, vaan pyrkinyt analysoimaan tulokset heti testattuani ne. Testipäiviä oli Arabian tehtailla melko tiuhaan tahtiin, joista yksi päivä oli työn loppupuolella tarvittavien muutostöiden takia mittauslaitteistoon. Olen kuitenkin tyytyväinen, että suoritin suurimman osan mittauksista varsin nopealla aikataululla, jotta pääsin analysoimaan tuloksia mahdollisimman pian.

Mittauslaitteistoa käyttöön ottaessa tuli eteen pieniä ongelmia. Aluksi tehtaan kunnossapidon täytyi muuttaa laitteistoa lasituotteille sopivaksi, jonka jälkeen testaukset pystyttiin aloittamaan. Kiinnityksien kanssa tuli ongelmia usean tuotteen kohdalla, sekä oikeanpainoisten testivasaroiden löytäminen kullekin tuotteelle oli välillä haastavaa.

Kaiken kaikkiaan olen tyytyväinen työhöni ja saamiini tuloksiin. Tehty työ tuli tarpeeseen lasitehtaalalle, ja jatkossa tehtyjä tuloksia voidaan vertailla tekemiini mittauksiin. Ohjeistusta voidaan hyödyntää ja tuotannossa voidaan toteuttaa mahdollisia kemiallisia muutoksia lasimassaan tuloksien perusteella. Työn suurimpana etuna itselleni pidän karttunutta tietämystä lasituotannosta ja laajan raportin laadinnasta.

Lähteet

- Ansys*. [www-sivu]. [viitattu 4.1.2011]. Saatavissa:
<http://www.fluent.com/solutions/examples>
- Falk, Thomas, Fredriksson, Hans, Holmér, Gunnel; Smålands museum- Sveriges glasmuseum, Johansson, Lars Gunnar, Lang, Maria, Sundberg, Peter* 2005. *Boken om glas*. Glafo.
- George W. McLellan, Errol B. Shand*, *Glass Engineering Handbook*, McGraw- Hill Book Company, Mc1958, 12-2
- Iittalan lasitehtaat*. Diaesitys.
- Oulun normaalikoulun portaali*. [www-sivu]. [viitattu 6.1.2011]. Saatavissa:
<http://norssi oulu.fi/projektit/6awww/heikkiva/jäähdyt.htm> Phillips & Pihkala, Juhani, 2004. *Prosessiteknikka. Kokonaisprojektit*. [www-sivu]. [viitattu 28.10.2010]. Saatavissa: <http://prosessiteknikka.kpedu.fi/doc-html/lasi.html>
- Pitman* 1948, *Glass: The Miracle Maker*.
- Tanaka Kikinzoku Group*. [www-sivu]. [viitattu 4.1.2011]. Saatavissa:
http://www.tanaka.co.jp/products-e/image/products1/e/e1_zu2.gif
- The Mahalakshmi Glass Works ltd*. [www-sivu]. [viitattu 4.1.2011]. Saatavissa:
<http://www.mgw.in/pnb.htm>
- Tooley*, *Handbook of Glass Manufacture*, 1953, 391
- Tähtivaara, Anna* 2008. *Lasin kemiaa verkossa. Pro gradu- tutkielma. Helsingin yliopisto. Kemian laitos. Matemaattis- luonnontieteellinen tiedekunta*. [www-sivu]. [viitattu 17.12.2010] Saatavissa:
http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/Tutkimus/progradut/pg_tahtivaara.pdf
- Ylen www- sivut*. [www-sivu]. [viitattu 4.1.2011]. Saatavissa:
http://yle.fi/ecepic/archive/00343/lasiresidenssi_lasi_343963b.jpg

Liitteet

Vain tilaajan kappaleessa.