

Opinnäytetyö (AMK)

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2019

Kalle Laato

# TUULILASIN VALMISTUKSESSA MUODOSTUVIEN KUPLIEN KARTOITTAMINEN

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikka

2019 | 55 sivua, 3 liitettä

Ohjaaja: Liisa Lehtinen

Kalle Laato

## TUULILASIN VALMISTUKSESSA SYNTYVIEN KUPLIEN KARTOITTAMINEN

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää tuulilasin valmistusprosessissa muodostuvien epätoivottujen kuplien syntymekanismeja ja esittää toimenpiteitä niiden ehkäisemiseksi. Tarkoituksena oli myös selvittää, mihin kohtaan tuotetta ja mistä syystä kupla syntyy, sekä mihin materiaaliin tai työvaiheeseen virhe pystyttäisiin rajaamaan. Kuplat ovat virheitä, jotka havaitaan vasta prosessin loppuvaiheessa, jolloin kustannukset pakkausprosessia lukuun ottamatta ovat jo syntyneet. Tämän vuoksi kyseisellä vialla on huomattava taloudellinen merkitys.

Opinnäytetyön teoriapohjassa perehdytään tuulilasin rakenteeseen, ominaisuuksiin sekä käyttötarkoitukseen. Tuulilasi koostuu kahdesta taivutetusta tasolasista sekä yhdestä tai useammasta välikalvosta. Teoriapohjassa tutustutaan näiden materiaalien ominaisuuksiin sekä niiden välisen adheesio toimintaan.

Opinnäytetyötä tehdessä selvisi, että pakkaamista lukuun ottamatta jokainen prosessivaihe sekä käytettävien raaka-aineiden laatu vaikuttavat kuplan muodostumiseen. Työssä esitellään jokainen prosessivaihe ja nostetaan esille niiden kuplan muodostumisen kannalta kriittiset pisteet. Tämän lisäksi esitellään kuplan syntymistä ennaltaehkäisevät toimintatavat sekä korjaavia toimenpiteitä.

Esille tuoduista korjaavista toimenpiteistä tärkeimmäksi nousi leikkuuprosessissa käytettävän veden laadun parantaminen. Muita kuplan muodostumisen ehkäisemiseksi ehdotettuja toimenpiteitä olivat huomion kiinnittäminen yleiseen siisteyteen 5S-toimintaperiaatteen avulla, osaamisen varmistuksen kehittäminen, huolellisuus tuotannossa, raaka-aineiden valitseminen, tuotantoparametrit ja -olosuhteet sekä niiden valvonta. Työn aikana löydettiin kaksi tuotetta, joiden valmistukseen on jatkossa kiinnitettävä erityishuomiota jatkossa.

ASIASANAT:

lasiteollisuus, tuulilasi, komposiitti, PVB-kalvo, laminointi, autoklavointi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Chemical and Materials Engineering

2019 | 55 pages, 3 appendices

Supervisor: Liisa Lehtinen

Kalle Laato

# ANALYSIS OF UNDESIRABLE BUBBLE FORMATION DURING WINDSHIELD MANUFACTURING PROCESS

The aim of this thesis was to study the formation mechanisms of undesirable bubbles during the windshield manufacturing process, and to propose measures to prevent them. One of the objectives was to find out in which part of the product a bubble was formed. Another objective was to investigate if the formation of a bubble could be tracked to a certain material or work stage. Bubbles are errors that are not detected until the end of the process, when costs other than those of the packaging process have already been generated. That is why this error has considerable economic significance.

The theoretical background of the thesis examines the structure, characteristics and purpose of a windshield. A Windshield consists of two bent, flat glass plates and one or more films. The theoretical part explains the properties of these materials and the adhesion between them.

During the study, it became clear that every process step, except for the packaging, as well as the quality of the raw materials used, affects the formation of the bubble. The thesis presents each process step and the critical points for bubble formation. In addition, the thesis introduces preventive practices and remedial measures for bubble formation.

The most important corrective action that stood out from the findings was the quality of the water used in the cutting process. Other measures proposed to prevent bubble formation include paying attention to the overall cleanliness in compliance with the 5S operating principle, development of competence assurance, cautiousness in production, selection of raw materials and monitoring of the production parameters and conditions. During the thesis project, two products were found which will require special attention in the future.

## KEYWORDS:

glass industry, windshield, composite, PVB film, lamination, autoclaving

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 TUULILASI</b>	<b>9</b>
2.1 Lasi	9
2.2 Tasolasi	10
2.3 PVB-kalvo	10
2.4 Tuulilasin iskunkestävyyden toimintaperiaate	12
<b>3 ADHEESIO</b>	<b>13</b>
3.1 Tuulilasikomponenttien välinen adheesio	14
3.2 Mineraalien vaikutus adheesioon	15
3.3 Kosteuden vaikutus adheesioon	16
3.4 Adheesio määrittäminen	16
<b>4 TUULILASIN VALMISTUSPROSESSI</b>	<b>18</b>
4.1 Leikkaus	18
4.2 Taivutus	19
4.3 Laminointi	20
4.4 Autoklaavausprosessi	20
4.5 Viimeistely ja pakkaus	21
<b>5 KUPLA</b>	<b>23</b>
5.1 Kuplan muodostuminen	23
5.2 Kuplan syntymekanismi	24
5.3 Kuplatyypit	25
5.3.1 Yksittäinen pallomainen kupla	26
5.3.2 Ryhmittyneet kuplat	26
5.3.3 Ryhmittyneet sameat kuplat	27
5.3.4 Liiallisesta kosteudesta syntyneet kuplat	28
5.3.5 Kontaminaatiosta johtuvat kuplat	29
5.4 Kuplatyypin varmentaminen	30
5.5 Kuplan vaikutus loppukäytössä	30

<b>6 PROSESSIVAIHEIDEN VAIKUTUKSET KUPLAN MUODOSTUMISELLE</b>	<b>32</b>
6.1 Tasolasi	32
6.2 Leikkuu	32
6.3 Taivutus	34
6.4 PVB-kalvon säilytysolosuhteet	35
6.5 Laminointi	35
6.6 Autoklaavausprosessi	37
6.7 Lopputarkastus	38
6.8 Kuplan muodostumisen ennaltaehkäisy 5S-toimintaperiaatteella	38
<b>7 PROSESSIPARAMETRIEN SEKÄ MATERIAALIEN TUTKIMUS JA ANALYSOINTI</b>	<b>41</b>
7.1 Kuplien määrät vuodenoittain	41
7.2 Autoklaavin kosteuden seuranta	42
7.3 Kuplien seuranta pakkaamossa	43
7.4 Hiontajäljen kartoitus	46
7.5 Prosessiveden laadunmääritys	48
7.6 Dowanolin käyttö	49
<b>8 YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT</b>	<b>51</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>54</b>

## LIITTEET

Liite 1. Kuplatyytit, niiden muodostumisen syyt sekä ennaltaehkäiseminen

Liite 2. Prosessiveden analyysin testausseleste

Liite 3. Vedenpuhdistuslaitteiston investointiraportti

## KUVAT

Kuva 1. Tuulilasin komponentit ja rakenne. 9

Kuva 2. Polyvinyylibutyraalin valmistusreaktio.<sup>23</sup> 11

Kuva 3. Lasin ja PVB-kalvon väliset kemialliset sidokset. Lasin pinta sisältää monia erilaisia kemiallisia yhdisteitä, jotka yhdistyvät autoklaavauksen aikana PVB-kalvon yhdisteisiin. Nämä sidokset muodostavat muuttumattoman sidoksen komponenttien välille, mikä sisältää heikkojen vetysidosten tiheän verkoston, sekä suuria yksittäisiä kemiallisia sidoksia. Näistä dominoivin on silanoliryhmä (Si-OH), joka suojaa lasin ja

kalvon välisiä Si-O-Si sidoksia vedeltä. Silanoliryhmien ja hydroksyyliiryhmien (-OH) sidosten avulla muodostuu komponenttien välinen adheesio. <sup>16</sup>	15
Kuva 4. Vesimolekyylin vaikutus PVB-kalvon ja lasin väliseen adheesioon. Vesimolekyyli (H <sub>2</sub> O) katkaisee lasin ja PVB-kalvon välisen hydroksyyliiryhmän (-OH), joka ylläpitää komponenttien välistä adheesiota. <sup>8</sup>	16
Kuva 5. Suurennos kuplasta tuulilasikomposiitin sisällä.	23
Kuva 6. Mahdollinen kuplan muodostumisen aiheuttaja – lasin reunan ja kalvon ennenaikainen saumautuminen ennen autoklaavausta.	24
Kuva 7. Yksittäisiä pallomaisia kuplia lasin reunalla.	26
Kuva 8. Ryhmittyneet kuplat.	27
Kuva 9. Ryhmittyneet sameat kuplat.	28
Kuva 10. Kosteudesta johtuva kupla.	29
Kuva 11. Lasiparin välisenpoikkeaman aiheuttama kupla.	30
Kuva 12. Tuulilasin rakenne, joka sisältää akustisen kalvon.	31
Kuva 13. Tuulilasin tunnisteet.	44
Kuva 14. Suurennos nauhahiomakoneella hiotun lasin hiomajäljistä.	47
Kuva 15. Suurennos nauhahiomakoneen hiomajäljistä lasin reunasta.	47
Kuva 16. CNC-hiontakoneen hiomajälki ennen hiontajäähdytinaineen lisäystä.	48
Kuva 17. CNC-hiomakoneen hiomajälki hiontajäähdytinaineen lisäyksen jälkeen.	48

## KUVIOT

Kuvio 1. Autoklaavausprosessin sykli.	21
Kuvio 2. Havaitut kuplat valmistetuissa kappaleissa kuukausittain ajanjaksolla joulukuu 2008 – joulukuu 2018.	41
Kuvio 3. Tuotteet, joissa havaittiin eniten kuplia seuranta-ajanjakson aikana.	44
Kuvio 4. Tuotteet ja niiden alueet, joissa havaittiin eniten kuplia.	45
Kuvio 5. Kuplan muodostumisen ehkäisemisen keskeisimmät asiat.	52

## TAULUKOT

Taulukko 1. Tuotantotilan olosuhteiden mittaustulosten vertailu mittausajanjaksolla kuukausittain.	42
Taulukko 2. Autoklaavausprosessin olosuhteiden mittaustulosten vertaaminen hallin olosuhteisiin.	43

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

5S	Toimintamalli, jonka tavoitteena on parantaa työn tuottavuutta standardoimalla työmenetelmät ja organisointi <sup>31</sup>
Adheesio	Energia, joka on välttämätön pitääkseen kaksi erilaista materiaalia rajapinnoistaan erottumattomana <sup>16</sup>
CIP	Cast in Place liquid resin <sup>13</sup> , paikallavalettu nestemäinen hartsi
CNC	Computerized Numerical Control <sup>11</sup> , tietokoneistettu numeerinen ohjaus
CST	Compressive Shear Test <sup>16</sup> , puristumurskaustesti
DIFFUUSIO	Hiukkasten liikehdintää suuremmasta pitoisuudesta laimeampaan <sup>30</sup>
DOWANOL TPM	Tripropylene glycol methyl ether <sup>26</sup> , tripropyleeniglykolimetyylieetteri
EPDM	Ethylene propylene diene Monomer <sup>21</sup> , eteenipropeenidieenimonomeeri
EVA	Ethyl vinyl acetate <sup>13</sup> , etyylivinyyliasetaatti
OEM	Original Equipment Manufacturer <sup>12</sup> , alkuperäinen laitevalmistaja
PVB	Polyvinyl butyral <sup>3</sup> , polyvinyylibutyraali
TPU	Thermoplastic polyurethane <sup>13</sup> , termoplastinen polyuretaani

# 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää tuulilasin valmistusprosessissa muodostuvien epätoivottujen kuplien syntymekanismia ja mitä toimenpiteitä muodostumisen ehkäisemiseksi voitaisiin tehdä. Nämä kuplat aiheuttavat tuotteelle lisäkäsittelyjä tai hylkäämistä, joka johtaa romutukseen. Kuplat havaitaan vasta prosessin loppuvaiheessa, jolloin muuttuvat kustannukset pakkausprosessia lukuun ottamatta ovat jo syntyneet. Tämän vuoksi vialla on huomattava taloudellinen merkitys.

Tuulilasi koostuu kahdesta tasolasista ja niiden väliin laminoidusta polyvinyylibutyraali (PVB) -välikalvosta. Opinnäytetyössä perehdyttiin tuulilasin valmistuksessa käytettäviin materiaaleihin. Opinnäytetyötä tehdessä selvisi, että jokainen prosessivaihe tuotteen pakkaamista lukuun ottamatta altistaa materiaalit kuplan muodostumiselle. Tämän vuoksi jokainen prosessivaihe on esitelty ja niiden kuplan muodostumisen kannalta kriittiset pisteet on nostettu esille. Prosessivaiheiden läpikäymisen lisäksi työssä esitellään kuplan syntymistä ennaltaehkäisevät toimintatavat sekä korjaustoimenpiteitä.

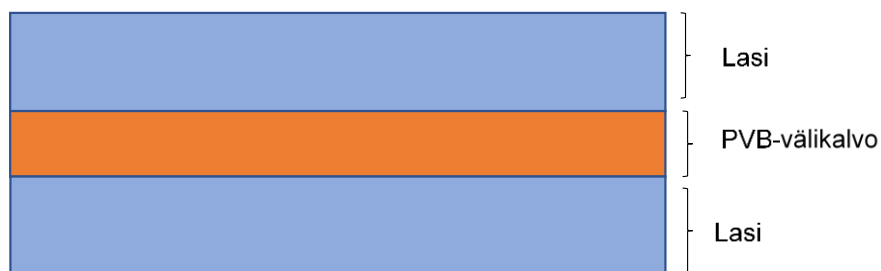
Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää, mihin kohtaan lasia ja mistä syystä kupla syntyy, sekä mihin materiaaliin tai työvaiheeseen virhe voitaisiin jäljittää. Näin pystytään jäljittämään mahdolliset toistuvat virheet ja tekemään korjaustoimenpiteitä prosessissa tuote tai työtehtävä kohtaisesti.

Opinnäytetyö tehtiin vuonna 1999 perustelulle Finn Lamex Safety Glass Oylle. Yritys valmistaa laminoituja turvalaseja joukko- ja tilausliikenteen ajoneuvoihin sekä maastossa ja maataloudessa käytettäviin raskaisiin työkoneisiin. Yrityksen erikoisosaaminen sekä suurin tuoteryhmä koostuu bussien ja linja-autojen tuulilaseista. Finn Lamex toimii alkuperäisvalmistajana (OEM-valmistaja), minkä lisäksi yritys toimittaa varaosia ajoneuvovalmistajille sekä tukkumyyjille.<sup>14</sup> Yritys toimii Laitilassa työllistäen noin 70 henkilöä.<sup>15</sup>



## 2 TUULILASI

Tuulilasi on turvalasi, joka muodostuu kahdesta taivutetusta taso- eli float-lasista sekä yhdestä tai useammasta polyvinylibutyraali (PVB) -kalvosta, kuten Kuvassa 1 on esitetty. Lasit ja muovikalvo yhdistetään komposiitiksi laminointiprosessissa, jonka jälkeen muodostunut laminaatti tiivistetään altistamalla se lämmölle ja paineelle autoklavointiprosessia.<sup>4</sup> Tuulilasin tarkoituksena on suojata ajoneuvon matkustajia ja sen sisäosia luonnonilmiöiltä, pölyltä, törmääviltä kappaleilta, UV-säteilyltä sekä melulta. Tuulilasi voi olla ajoneuvossa myös kantavana rakenteena.<sup>5</sup>



Kuva 1. Tuulilasin komponentit ja rakenne.

Tuulilasin kestävyys perustuu käytettävien materiaalien laatuun, sekä PVB-kalvon ja lasin välisen adheesio- ja lujuteen. Tämä takaa laminoinnin kestävyuden lasin särkyessä, jolloin lasi jää kiinni kalvoon.<sup>8</sup>

Lasin laminoinnin mahdollisuus löydettiin sattumalta vuonna 1903. Jo ensimmäisen maailmansodan aikana ominaisuutta käytettiin sotateollisuuden sovelluksissa. Laminoituneen lasin laajempi läpimurto tapahtui kuitenkin 1920-luvun lopulla, kun Henry Ford vaati, että jokaisella hänen tehtaansa valmistamassa autossa on oltava laminoitutuulilasi.<sup>20</sup>

### 2.1 Lasi

Lasi on rakennusmateriaali, joka valmistetaan pääosin hiekasta, soodasta ja kalkista. Sulan lasimassan homogenoimiseksi seokseen lisätään rautaa, magnesiumia, alumiinia sekä lasimurskaa ja eri seosaineita. Ajoneuvoissa käytettäviin laseihin lisätään myös

dolomiittia, nefeliinia ja sulfaattia.<sup>19</sup> Lasin molekyyli rakenne on homogeenisesti järjestäytymätön, minkä vuoksi se läpäisee valoa ja mahdollistaa sen läpi näkemisen.<sup>1</sup>

Lasin rakenteellisia ominaisuuksia voidaan muokata hallitsemalla sen ainesosien määrää toisiinsa nähden, vaadittujen ominaisuuksien ja käyttötarkoituksen mukaisiksi. Lasilevy, joka on paksuudeltaan 1 mm, on tiheydeltään 2,5 kg/m<sup>2</sup>.<sup>17</sup>

## 2.2 Tasolasi

Tasolasi eli float-lasi valmistetaan jatkuvalla valumenetelmällä, jolla saadaan aikaan lasinauha, jonka pinnat tasoitetaan sulan tinan päällä. Lasinauhan jäähtyttyä se leikataan halutun kokoiseksi levyiksi.<sup>2</sup>

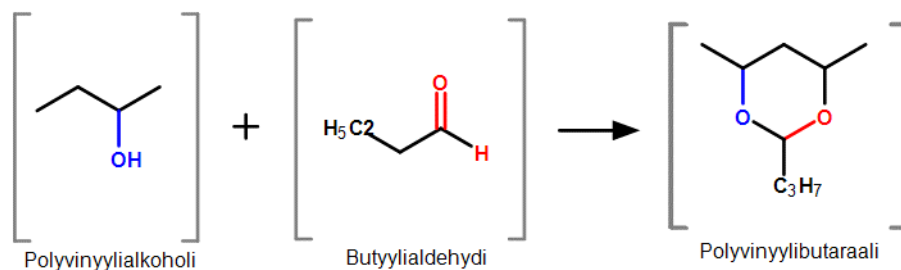
Yleisesti edelleen käytössä olevan jatkuvatoimisen lasin valmistusmenetelmän, float-menetelmän kehitti Alastair Pilkington vuonna 1952. Prosessissa sulatetaan lasimassaa sulatusuunissa noin 1000 °C:n lämpötilassa. Sulatuksen aikana lasineste muodostuu nauhaksi ja kelluu altaan pinnalla sulan tinan päällä. Tinan pinta on hyvin tasainen, mikä mahdollistaa lasille täydellisen tasapinnan. Lasin paksuutta säädelään lasinesteen syötön sekä vetonopeuden avulla. Tämän jälkeen lasinauha jäähdytetään hitaasti, kunnes se on täysin kovaa. Sitten lasipaneelit leikataan halutun kokoiseksi sekä vakioidaan.<sup>17</sup>

Menetelmän aluksi ainoa saavutettu lasipaksuus oli 6 mm, mutta nykyään menetelmällä voidaan valmistaa 0,4–25 mm:n paksuuksia laseja.<sup>18</sup> Valon läpäisymittarilla mitattuna 3 mm paksuinen raakalasi läpäisee valoa 91 % ja kahdesta saman paksuisesta lasista sekä kirkkaasta kalvosta valmistetun laminoidun lasin valon läpäisy on 81 %.

## 2.3 PVB-kalvo

Polyvinyylibutyaali eli PVB on kirkas, väritön, amorfinen kestopuovi, jota muodostetaan polyvinyylialkoholin ja butyylialdehydinin välisellä kondensaatioreaktiolla. PVB-kalvon tarkoituksena tuulilasin valmistuksessa on yhdistää kaksi tasolasia niin että ylikuormitustilanteessa lasin palaset eivät irtoa tuulilasista vaan jäävät kiinni lasien välissä olevaan kalvoon. PVB-kalvo lisää myös äänieristystä, sekä takaa lähes 100 %:in UV-säteilynsuojan.<sup>3</sup>

PVB-muovi on luokiteltu sekapolymeeriksi, koska se koostuu kahdesta eri elementistä, poolittomasta butyraaliryhmästä ja polaarista vinyylialkoholiryhmästä.<sup>16</sup> Kuvassa 2 on esitelty polyvinyylibutyaalin valmistusreaktio. PVB-kalvon valmistuksessa muovimassaan lisätään adheesiota parantavia pehmentimiä sekä UV-säteilyä ja hapettumista estäviä lisäaineita. Muovimassan sitomiseksi siihen lisätään pigmenttiaineita, jotka mahdollistavat eri väristen kalvojen valmistamisen.<sup>8</sup> Massaan lisätyt pehmentimet määräävät kalvon joustavuuden ja mahdollistavat tasaisen mekaanisen kestävyuden ja elastisuuden, mikä on suoraan verrannollinen adheesio vahvuuteen.<sup>16</sup>



Kuva 2. Polyvinyylibutyaalin valmistusreaktio.<sup>23</sup>

Lasin ja PVB-kalvon sidosprosessi tapahtuu lämmön ja paineen alaisena, minkä aikana kalvo pysyy optisesti kirkkaana yhdistäen samanaikaisesti kaksi tasolasia. Kun komponentit on liitetty toisiinsa, se toimii yhtenä yksikkönä ja näyttää samalta kuin yksittäinen lasi.<sup>23</sup>

PVB on ominaisuuksiltaan voimakkaasti sitoutuva ja joustava sekä sitkeä, minkä vuoksi se on hyvä materiaali komposiitin muodostamiseksi. Se on polyhydroksi ja polyasettaali, sillä se sisältää suuremman osuuden butyraali- ja hydroksyyliiryhmiä ja pienemmän määrän asetyyliiryhmiä. PVB-ryhmässä olevista ryhmistä vinyylialkoholiryhmä on hydrofiilinen, kun taas vinyylibutyaaliryhmä on luonteeltaan hydrofobinen. PVB:n poolittomat ja polaariset komponentit reagoivat muiden makromolekyylien kanssa ja siten se on yhteensopiva sekä hydrofiilisten että hydrofobisten komponenttien kanssa. Minkä tahansa monomeerikomponentin prosentuaalinen muutos voi muokata polymeerin hydrofiilisyyttä tai hydrofobisuutta.<sup>23</sup>

PVB on käytetyin materiaali laminoitujen turvalasien välikalvona ja sen suurin sovelluskohde on juuri ajoneuvojen tuulilasit. Ajoneuvoteollisuuden lisäksi PVB-kalvoa hyödynnetään esimerkiksi rakennusteollisuudessa laminoituna turvalasina ja

suojalasina sekä fotosähköteollisuudessa. PVB sopii käyttötarkoitukseltaan joustaviin pakkaussovelluksiin. Se on myrkytöntä ja jotkin sen laadut ovat hyväksytyjä kontaktiin elintarvikkeiden kanssa.<sup>13</sup>

Muita turvalaseissa käytettyjä välikalvomateriaaleja ovat ionoplastiset polymeerit, silloitettu etyylivinyyliasettaatti (EVA), paikallavalettu nestemäinen hartsi (CIP), sekä termoplastinen polyuretaani (TPU). Näistä vaihtoehdoista PVB on käyttöominaisuuksiltaan ja hinta-laatusuhteeltaan kannattavin ratkaisu tuulilasisovelluksiin.<sup>13</sup>

#### 2.4 Tuulilasin iskunkestävyyden toimintaperiaate

Ehjässä tuulilasissa molemmat lasit kantavat kuormitusta. Iskun tullessa ulkopuolelta ajoneuvon sisäpuoleinen lasi murtuu ja samalla ulkopuolinen lasi jää ainoaksi kantavaksi elementiksi. Kun molemmat levyt lopulta murtuvat, sirpaleet ovat päällimmäisessä levyssä toisissaan kiinni puristuneena yhdistettynä kalvon vetojännitykseen. Tämä vetojännitys mahdollistaa suuremman läpirikkoutumisen vastustuksen. Vastustuksen suuruus riippuu kalvomateriaalista sekä lasityypistä, jota on käytetty päällimmäiseen levyyn.<sup>13</sup>

Lasiparin ja PVB-kalvon välinen adheesio takaa lasisirpaleiden kiinnipysymisen kalvossa törmäyshetkellä. Jos lasin ja kalvon välinen adheesiotaso on liian matala, kalvo pysyy paikallaan, mutta saattaa olla poistettavissa lasien välistä. Tällainen lasi kestää iskun samalla tavalla kuin korkean adheesiotason omaava lasi, mutta muodostuvia lasinsirpaleita se ei pysty pitämään kiinni yhtä hyvin.<sup>16</sup>

### 3 ADHEESIO

Adheesio on energiaa, joka on välttämätöntä kahden erilaisen materiaalin pitämisen rajapinnoistaan erottumattomana.<sup>16</sup> Adheesio muodostava tartunta-aine vahvistaa kappaleiden koossapidettävyyttä. Tartunta-aineen tulee kastaa rajapinnat leviämällä tasaisesti ja luoda riittävä kosketuskulma. Aineelta vaaditaan läheinen kontakti yhdistettävien pintojen atomien ja molekyylien välillä.<sup>25</sup> Perusvaatimukset hyvälle tartunta-ainesidokselle ovat sopivan tartunta-aineen valinta, hyvä liitoskohdan muoto, pintojen puhtaus, kastuminen (aineen levinneisyys kontaktialueella), sekä sopivan tartunta-aineen sidoksen muodostus. Toisaalta adheesio viittaa myös tilaan, jossa kaksi erilaista perusosaa ovat tarttuneet toisiinsa läheisellä rajapintakontaktilla, kuten mekaanisella kontaktilla tai energialla, joka siirtyy pintojen välillä.<sup>29</sup>

Adheesio teorioita on kuusi erilaista; fysikaalinen adsorptio, kemialliset sidokset, diffuusio, sähköstaattisuus, mekaaninen riippuvuus sekä heikkojen rajapintojen kerrokset.<sup>25</sup>

#### 1. Fysikaalinen adsorptio

Fysikaalinen adsorptio on aina läsnäoleva, sillä kaikki liimautuvat aineet sisältävät molekyyliä läheisessä kosketuksessa. Fysikaalinen adsorptio sisältää rajapinnan ylittäviä van der Waalsin voimia. Näihin kuuluu pysyvien dipolien ja induoitujen dipolien välisiä vetovoimia.<sup>25</sup>

#### 2. Kemiallinen sidos

Kemiallinen sidos yhdistää rajapintoja kovalenttisen, ioni- tai vetysidoksen muodostumisella rajapinnalla.<sup>25</sup>

#### 3. Diffuusio

Diffuusiossa kosketuksissa olevat polymeerit voivat keskinäisesti diffusoitua, jolloin alkuperäinen rajapinta lopulta poistuu. Polymeeriketjut voivat diffusoitua keskenään, jos ne ovat liikkuvia ja toisiinsa yhteensopivia.<sup>25</sup>

#### 4. Sähköstaattinen adheesio

Sähköstaattisessa adheesiossa kaksi metallia asetetaan kontaktiin toistensa kanssa, jolloin elektronit siirtyvät toisesta metallista toiseen muodostaen sähköisen kaksoiskerroksen.<sup>25</sup>

## 5. Mekaaninen adheesio

Mekaanisessa adheesiossa epäsäännöllisen pinnan omaavien kappaleiden epätasaisuuksiin tunkeutuva tartunta-aine lujittaa kappaleet. Mekaaninen riippuvuus mahdollistaa tartunta-aineen liittymisen erityisesti huokoisten materiaalien sidoksiin.<sup>25</sup>

## 6. Heikkojen rajapintojen kerrokset

Heikon rajapinnan kerroksen omaavassa adheesiossa sileät pinnat voivat tuottaa vahvoja sidoksia, mutta jotkut epäpuhtaudet, kuten ruoste, öljyt tai rasvat tuottavat kerroksen, joka pysyy koossa vain heikosti ja voivat liueta tartunta-aineen vaikutuksesta.<sup>25</sup>

### 3.1 Tuulilasikomponenttien välinen adheesio

PVB-kalvon ja lasin välisen adheesio vahvuus vaikuttaa kuplien syntymisen. Komponenttien tiiveyden ollessa toisiinsa nähden heikko antaa se mahdollisuuden kuplan muodostumiselle laminoinnin aikana.

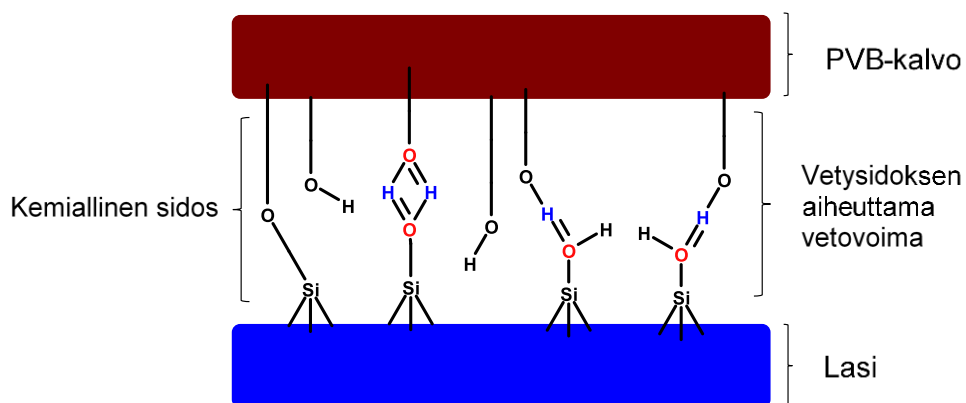
Lasin käsittely sekä PVB-kalvon säilytysolosuhteet vaikuttavat laminoinnin muodostamaan adheesioon. Esimerkiksi autoklaavausprosessissa tuote altistetaan korkeille lämpötiloille, paineelle ja näiden olosuhteiden ylläpitämiselle. Tämä prosessi vaatii riittävän korkeat lämpötilat oikeassa järjestyksessä riittävän adheesiotason saavuttamiseksi.<sup>16</sup>

Monet vaikuttavat tekijät häiritsevät adheesio muodostumista laminoinnin aikana, kuten itse lasin kemiallinen koostumus. Float-menetelmällä tuotetun tasolasin ilmapuoli on tinapuoleen verrattuna adheesioltaan matalampi. Lasin pinta saattaa kärsiä korroosiosta ennen laminointia. Lasin pesuprosessin ja siinä käytetyn veden laatu vaikuttavat adheesioon, kuten myös lasin ja kalvon pinnan kontaminaatiot. PVB-kalvon kemialliset sidokset reagoivat helposti veden kanssa. Kalvon kemialliset ominaisuudet ja laminoinnin aikainen kosteuspitoisuus vaikuttavat adheesio ominaisuuksiin.<sup>16</sup>

### 3.2 Mineraalien vaikutus adheesioon

Pesuprosessissa ilmentyvät suolat saattavat aiheuttaa poikkeamia PVB-kalvon ja lasin väliseen adheesioon. Lasinpesun tapahtuessa suolapitoisella vedellä, adheesio tason putoaminen ilmenee pummel-testin mitta-asteikolla jopa useina pummel-yksikköinä. Alkalimetalleilla on taipumuksena vetää ympäristöstään kosteutta puoleensa. Näiden metallien ollessa PVB-kalvon ja lasin rajapinnassa, niiden sisältämä kosteus joutuu laminoitavien kerrosten väliin heikentäen kalvon ja lasin välistä adheesiota. Tämä kerääntyvä kosteus johtaa veden ja PVB:n alkoholiryhmien välisten sidosten muodostumiseen, kuten myös lasin silanoliryhmien yhdistymiseen. Adheesio heikkenee vielä enemmän, jos maa-alkalimetalleja, kuten kalsiumia (Ca) joutuu lasin ja kalvon väliin. Nämä metallit saattavat vaikuttaa suoraan PVB:n alkoholiryhmiin, hajottamalla niiden välttämättömät adheesiota tukevat sidokset.<sup>16</sup> Kuvassa 3 on esitetty lasin ja PVB-kalvon välisiä kemiallisia sidoksia.

Veden sähkönjohtavuus syntyy siinä olevista ioneista. Mitä enemmän nesteessä on ioneja, sen sähköä johtavampaa se on.<sup>24</sup> Sähkönjohtavuutta seuraamalla voidaan saada osviittaa siitä, kuinka mineraalipitoista vesi on.<sup>34</sup> Yksittäisten aineiden pitoisuudet voidaan määrittää kemiallisin analyysin. Pesuprosessissa käytettävän veden laatua säättämällä pystytään vaikuttamaan lasien puhtauteen ja sitä kautta komponenttien välisen adheesio- ja lujuteen sekä kuplien ehkäisemiseen.

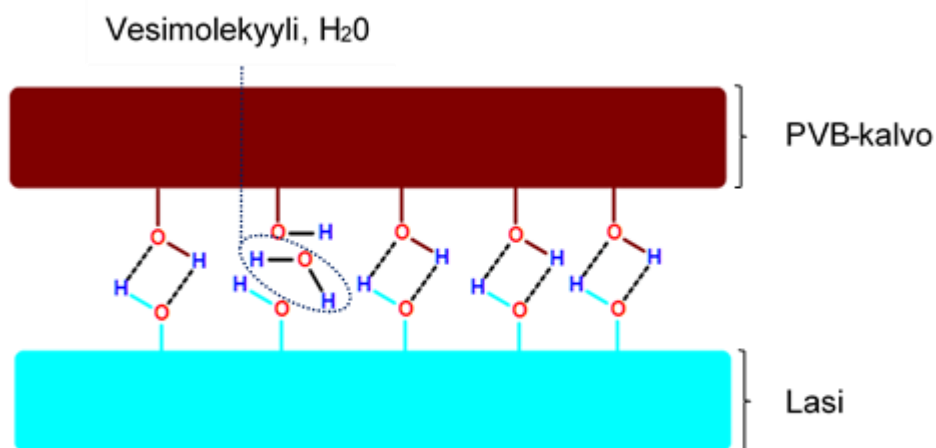


Kuva 3. Lasin ja PVB-kalvon väliset kemialliset sidokset. Lasin pinta sisältää monia erilaisia kemiallisia yhdisteitä, jotka yhdistyvät autoklaavauksen aikana PVB-kalvon yhdisteisiin. Nämä sidokset muodostavat muuttumattoman sidoksen komponenttien välille, mikä sisältää heikkojen vetysidosten tiheän verkoston, sekä suuria yksittäisiä kemiallisia sidoksia. Näistä dominoivin on silanoliryhmä (Si-OH), joka suojaa lasin ja

kalvon välisiä Si-O-Si sidoksia vedeltä. Silanoliryhmien ja hydroksyyliiryhmien (-OH) sidosten avulla muodostuu komponenttien välinen adheesio.<sup>16</sup>

### 3.3 Kosteuden vaikutus adheesioon

On havaittu, että kosteus aiheuttaa muutoksia sidosvahvuuteen. Vesi, joka on hyvin poolinen yhdiste, alentaa lasin pinnalla olemassa olevien sidosten toimivuutta. Koska PVB:ssa on paljon poolisia alkoholiryhmiä, on PVB kosteutta sitova materiaali, joka pyrkii aktiivisesti nostamaan kosteuspitoisuuttaan. PVB vetää kosteutta itseensä ympäristöstään. Suositeltu kalvonkosteus laminoinnin aikana on noin 0,4 %. Epäsuotuisissa olosuhteissa kalvonkosteus voi itsessään nousta yli kahden prosentin.<sup>16</sup> Kuvassa 4 on havainnointu vesimolekyylin vaikutusta tuulilasin komponenttien väliseen adheesioon.



Kuva 4. Vesimolekyylin vaikutus PVB-kalvon ja lasin väliseen adheesioon. Vesimolekyyli (H<sub>2</sub>O) katkaisee lasin ja PVB-kalvon välisen hydroksyyliiryhmän (-OH), joka ylläpitää komponenttien välistä adheesiota.<sup>8</sup>

### 3.4 Adheesio määrittäminen

Lasien ja PVB-kalvon välistä adheesiota voidaan mitata pummel- ja compressive shear-testillä (CST). Toisiinsa nähden näiden kahden testin tulokset ovat lähes lineaarisella korrelaatiolla samanlaiset.<sup>16</sup>



Pummel-testissä kooltaan epäspesifien laminoitulasi jäädytetään  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minkä jälkeen siihen isketään 1 naulan painoinen (453,6 g) moukari, joka on lasia ylempänä. Sama toistetaan lasin molemmille puolille. Seuraavaksi näyte arvioidaan visuaalisesti mekanismin mitta-asteikon mukaisesti. Asteikko havainnoi adheesiota molekyyllitasolla arvoilla nolasta kymmeneen, jossa nolla kuvastaa PVB-kalvon vahingon vaaraa. Tämä lisäksi asteikko kuvaa kalvon peittävyyttä lasisirpaleista kymmenestä prosentista sataan prosenttiin.<sup>16</sup>

CST-testi sisältää pienikokoisen näytekappaleen. Useimmiten näytekappaleet ovat kulmamitaltaan vain 2,54 cm ja ne asetetaan 45 asteen kulmassa mekaaniseen testilaitteistoon. Vähimmäisvoima, joka vaaditaan lasin rikkoutumiseen mitataan yksikkönä naulaa per neliometri (PSI tai  $\text{N}/\text{mm}^2$ ). CST-testi antaa enemmän objektiivista tietoa kuin pummel-testi, mutta tulosten lukemat riippuvat kuitenkin kalvon kerroksista ja niiden tiheydestä.<sup>16</sup>

## 4 TUULILASIN VALMISTUSPROSESSI

Tuulilasin valmistusprosessi koostuu viidestä eri vaiheesta, jossa kahdesta tasolasista ensin leikataan, hiotaan ja sitten taivutetaan valmistettavan tuotteen muotoiset kappaleet. Tämän jälkeen lasien väliin laminoidaan PVB-muovikalvo ja autoklaavoidaan. Autoklaavausprosessin jälkeen tuote on valmis viimeistelyyn ja lisävarusteiden kiinnittämiseen. Lopuksi lasit pakataan kuljetusta varten.

### 4.1 Leikkuu

Leikkuu on tasolasin työstön ensimmäinen vaihe, jossa lasilevystä leikataan halutun muotoinen kappale. Laseja leikataan jokaista tuotetta kohden kaksi eri pituista lasia. Lasiparin kappaleiden tulee olla eri pituiset, jotta lopputuotteessa lasien reunat kohtaavat, eikä syntyisi epätoivottua porrastusta. Leikkuri tekee leikkuuohjelman mukaiset viillot lasin pintaan. Ylijäävä lasi irrotetaan viillojen mukaisesti muodosta manuaalisesti.

Irroutuksen jälkeen kappale hiotaan manuaalisesti nauhahiomakoneella tai automaattisesti CNC-hiomakoneella. Heti hionnan jälkeen lasiin porataan mahdolliset reiät. Hiotut lasit pestään hionnan jälkeen pesukoneessa epäpuhtauksien poistamiseksi. CNC-hiotut lasit pestään ennen varsinaista pesua esipesukoneella.

Pesun jälkeen lasiparien lyhyet lasit kulkevat silkkipainoon, jossa niihin painetaan tarvittaessa haluttu kuvio. Jos silkkipainoa ei suoriteta, lasit ohittavat prosessivaiheen. Lasiparien pitkät lasit käyvät läpi pölytysvaiheen. Pölytyksessä lasin päälle sumutetaan tislattua vedestä ja piimaapölystä sekoitettua liuosta. Pölytyksen tarkoituksena on estää lasien kiinni palaminen toisiinsa taivutuksen aikana.<sup>10</sup>

Lasin reunoille painetaan silkkipainomenetelmällä lähes poikkeuksetta musta kuvio lasin reunoille, joka lisää visuaalisuutta sekä peittää ja suojaa liimattavaa pintaa. Tämän lisäksi lasiin painetaan tuotekohtaiset leimat ja logot. Painomuste painetaan sisimmäisen lasin ulkopuolelle eli ns. ilmapuolelle eikä tinapuolelle. Painomusteen viskositeettia seurataan viskosimetrillä ja ohennetaan tarvittaessa. Leikatut, hiotut ja painetut lasit paritetaan ja pinotaan päällekkäin niin, että lasiparista pidempi lasi on alimmaisena ja lyhyt lasi päällimmäisenä. Parit erotellaan toisistaan styroksimaisilla, paloilla eli tolloilla.<sup>9</sup>

Hiomaton lasi on hiottua kestävämpi, mutta hiomaton reuna on vaarallinen. Lasin reunojen hionta lisää lasin turvallisuutta jatkojalostuksessa sekä loppukäytössä. Hionnan huono laatu vähentää lasin kestävyttä, sillä lasi kestää melko hyvin räsitusta, mutta virheet heikentävät sitä.<sup>10</sup>

## 4.2 Taivutus

Taivutuksessa tasolasi saa tuotteelle halutun kaarevan muodon. Taivutus tapahtuu yksittäis- tai sarjauuneissa. Uunissa tasolasia kuumennetaan muotin päällä ennalta ohjelmoidun yksilöllisen lämmityskuvion mukaisesti niin, että lasi taipuu painovoiman vaikutuksesta muotin määräämän muotoon. Taivutuksen jälkeen lasista puhdistetaan mahdolliset tuhkat ja liidut, jolla vähennetään seuraavan työvaiheen epäpuhtauksien määrää.

Taivuttaminen tapahtuu tuotekohtaisen muotin avulla, joka asetetaan uunihissin päälle nostimen avulla. Päällekkäiset tasolasit nostetaan nostimella muotin päälle vaakatasossa. Lasiparin ollessa muotilla se nostetaan uunihissillä lähelle vastuksia sekä valitaan tuotekohtainen taivutusohjelma. Ohjelma alkaa esitaivutusykyllä, jossa lämpötilaa nostetaan asteittain. Varsinaisen taivutusykylin alkaessa lämpötilaa nostetaan vielä korkeammaksi. Taivutuslämpötila on tuotteesta riippuen noin 600 °C.

Lämmityssykylien jälkeen uunista sammutetaan lämmöt ja annetaan lasin jäähtyä. Lasin annetaan jäähtyä ensin uunissa lämmityksen ollessa pois päältä ja tämän jälkeen noin 45 min uunin ulkopuolella. Itse taivutuksen aika on sama, keskimäärin 45 min. Jäähdytysaika on tuotekohtainen ja riippuu lasin koosta, materiaalin paksuudesta sekä taivutettavasta muodosta.<sup>10</sup>

Finn Lamex Safety Glass Oy:llä on käytössään kaksi sarjauunia. Molemmilla sarjauuneilla pystytään pitämään jatkuvatoimisessa prosessissa kuutta eri tuotetta samanaikaisesti kierrossa. Tuotteet käyvät taivutusykyliet läpi vaunuissa, joita on kuusi. Näiden vaunujen kokonaisläpimenoaika on noin 1 t 45 min. Kunkin syklin aika on noin 900 s. Ensimmäiset kaksi sykliä on esitaivutusykyliet, joissa lämpötilaa nostetaan asteittain. Toisessa syklistä lämpötila nousee yli 480 °C:een. Kolmas sykli on varsinainen taivutusykyliet, jonka jälkeen alkaa kolme jäähdytysykyliet.<sup>10</sup>

Suuremmassa sarjauunissa lasit ja niiden muotit nostetaan nostimella uunin vaunuun ja pois. Tämä siirto voidaan tehdä pienemmässä uunissa käsin. Taivutusykylien jälkeen

lasien reunat teipataan ja niiden kulmiin tai väleihin lisätään pehmusteet, jotka suojaavat ja erottavat lasit toisistaan. Lasien muoto tarkistetaan tuotekohtaisella muotilla eli jigillä. Tämän jälkeen lasit asetellaan varastointipukeille. Lasiparit erotellaan asettamalla niiden väleihin styroksimaiset palat eli tollot.

#### 4.3 Laminointi

Laminoinnin aluksi lasiparit nostetaan imukuppinostimella telineelle, jossa parit erotetaan niin, että lyhyempi lasi pystytään nostamaan pois pidemmän päältä. Lasien sisäpuolet puhdistetaan, jonka jälkeen kalvorullasta leikataan oikean kokoinen arkki ja asetetaan se keskelle lasia. Jos lasissa on värillinen osa-alue, se huomioidaan värimerkkitarra avulla. Tämä on kohdassa, johon värillisen osan tulee loppua. Tämän jälkeen lyhyt lasi asetetaan kalvon päälle ja lasit keskitetään lasin reunoissa olevien merkkien avulla. Tuulilasin kerrosten ollessa päällekkäin ylijäämäkalvo leikataan pois niin, että lasin reunoille jää 2–3 mm kalvoa. Lasiparin ympärille asetetaan imu- eli vakuumiletku, joka peittää lasin reunan kauttaaltaan. Letku kytketään alipaineverkkoon noin -1 barin imun aikaansaamiseksi. Lasipari siirretään autoklaavauspukille siirrettäviä putkia vasten, joilla lasiparit pidetään erillään toisistaan. Lasiparien väli pukilla toisiinsa nähden on noin 10 cm. Imuletkun asettamisen jälkeen lasi tulee olla kytkettynä alipaineverkkoon, jossa alipaine ylläpidetään alle 0,8 barissa. Laseja pidetään alipaineessa vähintään 30 min ennen autoklaavausprosessia, jotta ylimääräinen ilma poistuu.<sup>10</sup>

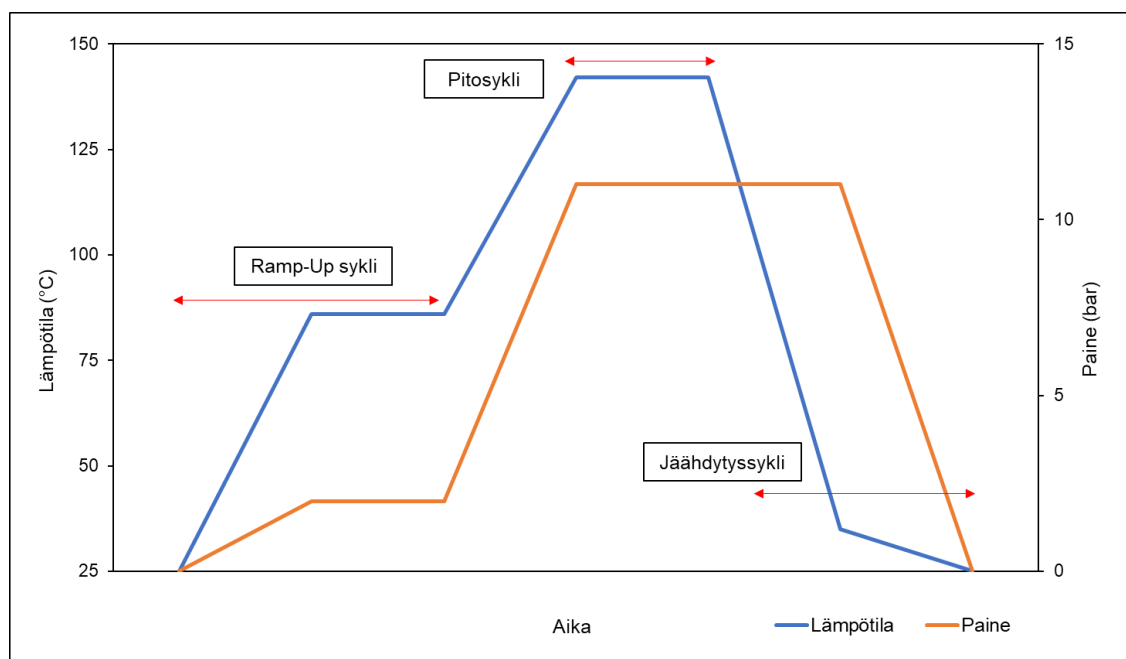
Lämmitettäviä tuulilaseja varten valmiiksi leikattuihin kalvoihin asennetaan lämmityskiskot, joita pitkin lämmitykseen tarvittava sähkö johdetaan. Ennen asennusta kalvo teipataan kiinni tuotekohtaisen muottiarkin päälle, joka on asetettu pöydälle. Muotista näkee tuotteen ääriviivat sekä langoistuskaavion, jonka mukaisesti kisko asennetaan kalvoon. Lämmityslanka painetaan kiinni kalvoon automaattisella langoituskoneella. Lämmityslangan yhdistäessä kaksi kiskoa syntyy lämmityskenttä, johon lisätään vielä ulostulot.

#### 4.4 Autoklaavausprosessi

Autoklaavauksen tarkoituksena on poistaa ylimääräistä ilmaa lasien välistä sekä tiivistää syntyvä komposiitti sulattamalla PVB-kalvo kovan paineen ja lämmön alaisena.<sup>8</sup>

Autoklaavausprosessi tapahtuu vaakatasossa olevassa autoklaavissa, joka on muodoltaan lieriön muotoinen. Autoklaavi on asetettu lattiasyvennykseen, jonne autoklaavauspukit kuljetaan siirtosillan yli lavansiirtotrukin avulla. Autoklaavausprosessi on kestoltaan noin 3,5 h ja se jaotellaan kolmeen sykliin, jotka esitellään Kuviossa 1.

Ensimmäisessä ramp up (lämmitys) -syklissä autoklaavin lämpötila nostetaan noin 85 °C:seen ja paine nostetaan hieman yli 2 barin. Nämä olosuhteet pidetään stabiilina noin 20 min ajan.<sup>10</sup> Paineen nosto estää ilman tunkeutumisen lasin ja PVB-kalvon väliin sekä supistaa kalvon kokoa.<sup>8</sup> Tämän jälkeen aletaan nostamaan lämpötilaa ja painetta. Kun saavutetaan noin 145 °C:n lämpötila ja yli 10 barin paine alkaa pitosykli, jonka aikana olosuhteet pidetään stabiilina lähes 50 min:n ajan. Pitoajan päätyttyä alkaa vesikiertojäähdytys. Jäähdytyslämpötilan laskiessa alle 40 °C:n autoklaavista päästetään paine päästämällä ilmaa ulos. Lämpötilan laskiessa vielä hieman autoklaavin paine on lähes sama kuin ilmanpaine, jolloin autoklaavin ovi voidaan avata syklin päätössummerin ilmoituksen jälkeen ja poistaa autoklaavauspukit autoklaavista.<sup>10</sup>



Kuvio 1. Autoklaavausprosessin syklit.

#### 4.5 Viimeistely ja pakkaus

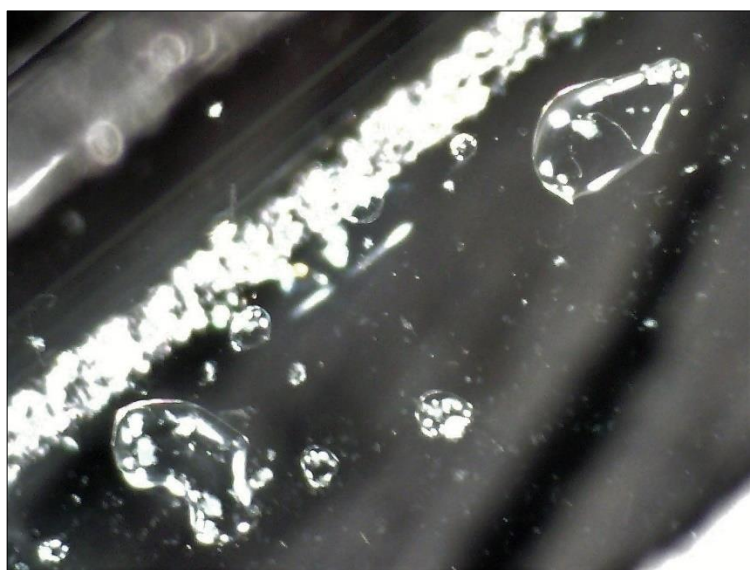
Viimeistelyssä irrotetaan lasin reunoilta imuletkut ja nipsut sekä poistetaan ylimääräinen kalvopurske. Lisäksi lasiin lisätään raamit sekä mahdolliset lisätarvikkeet, esimerkiksi

liimataan lamppujen ja sensoreiden kiinnikkeet ja erilaiset raudat. Tässä vaiheessa tehdään myös liittimien juotokset lämmitettävälle lasille. Lopuksi lasit pakataan puulaatikoihin.<sup>9</sup> Tietyissä malleissa lasin reunaan lisätään tiivistysainetta sähkön johtavuuden estämiseksi tai suojaksi ääriolosuhteita vastaan.<sup>10</sup>

## 5 KUPLA

Kupla eli kaasusulkeuma sijaitsee lasissa tai PVB-kalvossa tai näiden välissä. Kuplat sijaitsevat yleisimmin tuulilasin reunoilla. Kupla on hyvin suurella todennäköisyydellä jäljelle jäänyttä ilmaa tai ilmaa, joka on tunkeutunut tuotteeseen autoklaavauksen aikana. Kupla voi muodostua myös kontaminaation eli epäpuhtauden tai lasiparien välisen poikkeaman aiheuttaman välin takia, joka on niin suuri, ettei kalvo pysty kompensoimaan sitä.<sup>6</sup>

Kuplat ovat ulkonäöltään kiiltäviä tai läpikuultavia riippuen niiden määrästä ja kuinka syvällä ne ovat materiaalissa. Kontaminaatiosta johtuvien kuplien väri riippuu kontaminaation aiheuttajasta. Muodoltaan kuplat ovat tavallisesti pisaran kaltaisia, pallomaisia ja reunoiltaan pyöristettyjä. Ne voivat olla vaihtelevasti eri kokoisia sekä muodoltaan epäsäännöllisiä, kuten Kuvasta 5 voidaan huomata. Kuitenkin niiden ulkokehä on lähes poikkeuksetta suljettu.<sup>6</sup>



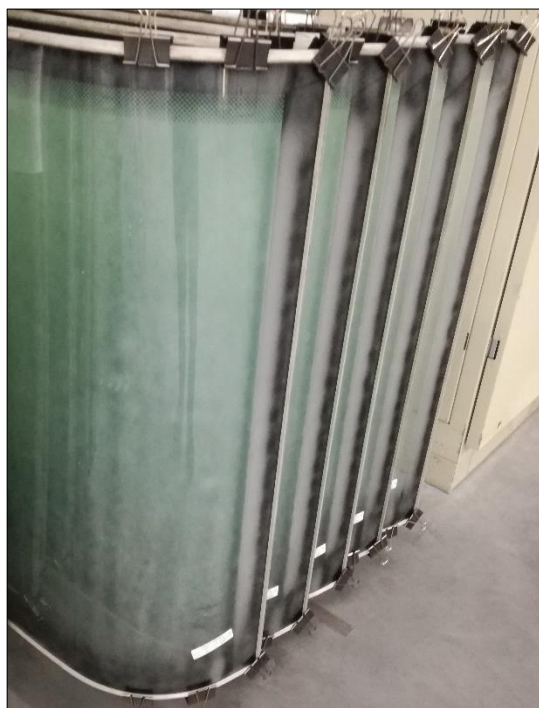
Kuva 5. Suurennos kuplasta tuulilasikomposiitin sisällä.

### 5.1 Kuplan muodostuminen

Kuplan muodostumiseen ei ole löytynyt vain yhtä syytä, vaan syitä voi olla monia tai näiden summa. Poikkeama, joka voi aiheuttaa kuplan, voidaan havaita heti laminoinnin jälkeen. Esimerkiksi kuvassa 6 on alkanut ennen aikainen saumautuminen, jossa lasin ja

kalvon välissä oleva ilma ei pääse pois, vaan jää komponenttien väliin näkyen harmahtavana alueena. Itse kupla havaitaan vasta autoklaavauksen jälkeen.

Kuplia pysytään välttämään oikeanlaisilla työskentelytavoilla, mutta niitä voi muodostua myös olosuhteiden vaikutuksesta. Kuplien ollessa kooltaan pieniä ja määrältään vähäisiä pysytään kuplia poistamaan uudelleen autoklaavoinnilla. Jos kuplat ovat suuria tai niitä on määrällisesti paljon, niitä ei pystytä poistamaan. Kuplien poistaminen ei myöskään onnistu, jos ne ovat sijoittautuneet kauaksi lasin reunasta. Kuplien muodostuminen ja niiden havaitseminen tapahtuu tuulilasin valmistusprosessin loppuvaiheessa, jolloin tuote on lähes valmis. Tästä syystä hävikkiin menneestä tuotteesta tulee taloudellisesti suuri menoerä.



Kuva 6. Mahdollinen kuplan muodostumisen aiheuttaja – lasin reunan ja kalvon ennenaikainen saumautuminen ennen autoklaavausta.

## 5.2 Kuplan syntymekanismi

Kuplien yleisimmät syntymekanismit voidaan jakaa seuraavaan neljään ryhmään:

1. Puutteellinen tiivistys komposiitissa.



Lasien ja PVB-kalvon välisen tiivistyksen puutteellisuus altistaa komposiitin ilman tai kosteuden tunkeutumiselle komponenttien väliin. Tunkeutuminen tapahtuu autoklaavausprosessin aikana korkean paineen vaikutuksesta.<sup>6</sup>

2. PVB-kalvon ja lasien ennenaikainen saumautuminen.

Laminoinnin aikana tai tämän jälkeen lasin ja PVB-kalvon reunat saattavat saumautua liian aikaisin, jolloin lasin ja kalvon väliin jää ilmaa. Tätä ilmaa ei pystytä haihduttamaan täydellisesti autoklaavausprosessin aikana, jolloin ilma jää komposiittiin.<sup>6</sup>

3. Autoklaavausprosessin aikaisen paineenmuutoksen vaikutus.

Kun autoklaavauksen aikana liuennut ja hajautettu ilma on lasien välissä alemmassa paineessa kuin lasin ulkopuolella oleva paine. Silloin ilma pääsee poistumaan lasien ja kalvon välistä ulkopuolisen paineen vaikutuksesta. Jos paine kuitenkin alenee lasien ulkopuolella PVB-kalvon ollessa vielä pehmeää, saattaa lasien ja kalvon väliin tunkeutua ilmaa. Samoissa olosuhteissa kalvon ollessa vielä pehmeää kalvon paine saattaa ylikyllästyä, jolloin kalvossa tai lasin ja kalvon välissä oleva ilma saattaa laajeta muodostaen kuplia etenkin lasin reunoille.<sup>6</sup>

4. Korkea kosteuspitoisuus PVB-kalvossa ja veden läsnäolo lasin pinnalla.

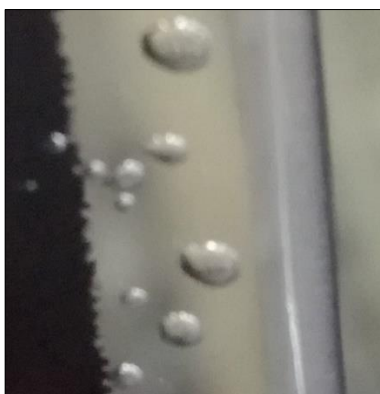
Korkeassa lämpötilassa lasin ja kalvon väliin jäävä neste kuivuu ja muodostaa materiaalien väliin ilmataskun eli kuplan. Ennen tätä PVB-kalvo on saattanut olla säilytettynä liian kosteissa olosuhteissa, jolloin se on kerännyt kosteutta ympäristöstä itseensä. Tai ennen laminointia lasin pinnalle on saattanut tiivistyä kosteutta, joka on jäänyt myöhemmin vangiksi komposiitin väliin.<sup>6</sup>

### 5.3 Kuplatyypit

Kuplatyyppejä on erilaisia ja ne riippuvat niiden syntymekanismeista. Tässä osiossa käydään läpi kuuden eri tunnistettavimman kuplatyyppin ominaisuuksia. Liitteessä 1 kuplatyypit, niiden muodostumissy sekä ennalta ehkäisemistoimenpiteet ovat esitelty taulukkomuodossa.

### 5.3.1 Yksittäinen pallomainen kupla

Yksittäinen kupla lasin reunoilla on mahdollisesti syntynyt, kun autoklaavauksen viimeisen syklin aikana on päästetty painetta ulos ja autoklaavissa on ollut vielä liian korkea lämpötila. Tällöin PVB-kalvo saattaa olla vielä pehmeää. Kuplien jäädessä vaille paineen aiheuttamaa puristusta, mikä muuten pusertaisi ne ulos materiaalista, ne jäävät lasin reunoille, kuten Kuvassa 7. Myös autoklaavin liika kosteus tai heikosti tiivistetyt reunat lasissa ovat voineet aiheuttaa kuplan muodostumisen.<sup>6</sup>

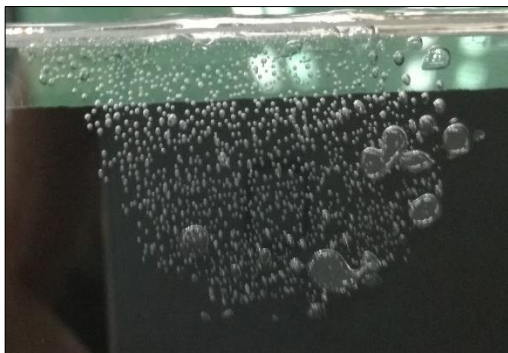


Kuva 7. Yksittäisiä pallomaisia kuplia lasin reunalla.

Kuplatyyppin muodostumisen ehkäisemiseksi viimeisen autoklaavaussyklin jäähtytyksen tulisi olla alle 45 °C. Autoklaavin kosteus on pidettävä mahdollisimman alhaisena ja mahdollinen kosteus on kuivattava tarvittaessa. Reunojen tiivistymistä voidaan varmistaa tiivistysaineilla, esimerkiksi ruiskuttamalla lasin reunoille tripropyleeniglykolimetyylieetteriä (Dowanolia).<sup>6</sup>

### 5.3.2 Ryhmittyneet kuplat

Kuplia saattaa syntyä aivan lasin reunoille ryhmittäin. Kuvan 8 mukaisesti kuplien sijainti on keskittynyt yhteen kohtaan lasia, mutta niiden koko saattaa vaihdella. Syyinä on yleensä puutteellinen tiivistys laminoinnin alussa tai auennut tiivistys ennen esilaminointia.<sup>8</sup>



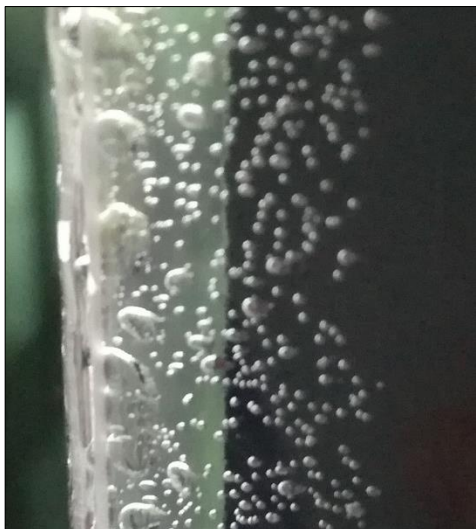
Kuva 8. Ryhmittyneet kuplat.

Kuplatyyppin ehkäisemiseksi voidaan nostaa esilaminoinnin lämpötilaa. Lasien ja PVB-kalvon tiivistyminen voidaan varmistaa leikkaamalla laminoinnissa kalvon koko hieman pidempää lasia suuremmaksi. Muodostuvan komposiitin tiivistyksen kontaktialueeseen, eli lasin reunaan, kohdistuva paine tulisi varmistaa autoklaavauksen aikana imuletkun tiiveydellä sekä alipaineen ylläpitämisellä.<sup>6</sup>

### 5.3.3 Ryhmittyneet sameat kuplat

Kuplat ovat edellä mainittuihin ryhmittyneisiin kupliin verrattuna samankaltaisia, mutta kuten Kuvasta 9 voidaan nähdä, ne ovat ulkonäöltään sameampia. Niiden muodostuminen havaitaan usein jo laminoinnin jälkeen ennen autoklaavausta vaaleina ja läpikuultavina alueina.<sup>8</sup>

Syynä kuplatyyppin muodostumiseen saattaa olla lasiparien epäsopivuus tai epätäsmällinen keskitys toisiinsa nähden, josta syntyy poikkeama lasien välille. Tämä aiheuttaa sen, että lasi ja kalvo eivät muodosta tiivistä saumaa, vaan väliin pääsee ilmaa ja kosteutta, jotka muodostavat kuplan. Kuplatyyppi muodostuu autoklaavausprosessissa, kun autoklaavaussyklin aikana paine on liian alhainen samalla, kun lämpötila nousee nopeasti. Tämän lisäksi väärän kokoinen tai huonosti aseteltu PVB-kalvo saattaa aiheuttaa sameiden kuplaryhmittymien syntymistä. Myös liian tiukkaan toisiinsa liitetyt materiaalit voivat olla syynä kuplatyyppin muodostumiselle.<sup>8</sup>



Kuva 9. Ryhmittyneet sameat kuplat.

Kuplatyyppien muodostumista voidaan ehkäistä varmistamalla lasiparien sopivuus ja oikeanlainen keskittäminen toisiinsa nähden. Autoklaavausprosessin oikeanlainen toiminta tulisi varmistaa, jotta syklien paineen ja lämpötilan suhde on oikeanlainen. Laminoititilan olosuhteita on seurattava ja muutoksiin on reagoitava välittömästi. Laminoitiprosessissa tulisi PVB-kalvosta leikata työohjeiden mukainen kappale, jotta kalvo peittää pidemmän lasin kokonaan niin, että kalvo tulee hieman lasin reunan yli saumautumisen onnistumiseksi. PVB-kalvo tulisi valita ja asettaa työohjeiden mukaisesti, jotta materiaalit eivät jää liian tiukkaan toisiinsa.<sup>6</sup>

#### 5.3.4 Liiallisesta kosteudesta syntyneet kuplat

Lasin ja PVB-kalvon väliin jäädessä suuri määrä kosteutta syntyy kuplan muodostumiselle alkupiste. Autoklaavauksessa lasi lämpenee ja lasin väliin jäänyt kosteus laajenee alkupisteestä muodostaen kuplia leveänä rykelmänä. Kuvasta 10 ilmenee kuplan alkupiste ja sen laajentuminen. Riippuen kosteuden sijainnista kuplat eivät välttämättä poistu autoklaavauksen aikana. Kosteus voi johtua lasien puutteellisesta kuivaamisesta taivutuksen ja laminoinnin välisessä puhdistuksessa. Kosteutta saattaa myös kondensoitua ilmasta lasin tai PVB-kalvon pintaan.<sup>6</sup>



Kuva 10. Kosteudesta johtuva kupla.

Kuivaus tulisi suorittaa puhdistuksen jälkeen ennen laminointia, jotta kosteutta ei jää lasien pinnalle. PVB-kalvot on säilytettävä ja kuljetettava niin, että ne eivät ole pääse kontaktiin veden tai kosteuden kanssa. Laminointitilan olosuhteet on pidettävä sellaisena, että kosteutta ei pääse tiivistymään tilan rakenteisiin tai käytettäviin materiaaleihin. Kalvo on kuivattava välittömästi, jos siinä havaitaan vettä. Ennen laminointivaihetta tulisi varmistaa, ettei kalvon ja lasien väliin ole jäänyt kosteutta.<sup>6</sup>

### 5.3.5 Kontaminaatiosta johtuvat kuplat

Lasin ja PVB-kalvon välissä oleva partikkeli tai kahden lasiparin välinen poikkeama, jota kalvo ei pysty täyttämään, aiheuttaa kontaminaation. Lasiparin välisen poikkeaman aiheuttama kupla on ilmataskun muotoinen, kuten Kuvasta 11 voidaan havaita.

Noin 0,2 mm tai suurempi poikkeama lasiparin lasien välillä aiheuttaa mahdollisuuden kuplan muodostumiselle.<sup>27</sup> Syy tähän ilmataskun aiheuttamaan kontaminaatioon voidaan havaita jo ennen laminointia tapahtuvissa työvaiheissa. Myös ylimääräisen partikkelin aiheuttama kontaminaatio voi tapahtua aikaisemmissa työvaiheissa.

Komposiittiin kuulumattoman partikkelin ympärille muodostuu kupla autoklavoinnin aikana, jos sen paksuus on niin suuri, ettei kalvo pysty täyttämään sen aiheuttamaa ilmataskua. Kuplan koko ja kuplien määrä riippuu vieraan materiaalin esiintymistiheydestä ja -laajuudesta lasissa tai kalvossa. Kuplan sijainti riippuu työvaiheesta, jossa kontaminaatio on syntynyt. Työvaiheet, joissa suoritetaan manuaalista työtä ovat alttiimpia kontaminaation syntymiselle.<sup>6</sup>



Kuva 11. Lasiparin välisenpoikkeaman aiheuttama kupla.

Kontaminaatiota voidaan välttää pitämällä työskentelyvälineet sekä työpisteet ja niiden ympäristöt siisteinä. Laminoititilassa on käytettävä asianmukaisia suojarusteita. Lasimateriaalille tehtävät puhdistukset on tehtävä huolellisesti, sekä ennen laminoitiprosessia suoritettavien työvaiheiden laatu on tarkastettava viimeistään ennen laminoinnin aloittamista. Jos kontaminaatiosta johtuvia kuplia esiintyy, on kontaminaation aiheuttanut tekijä analysoitava sekä jäljitettävä uuden kontaminaation välttämiseksi.<sup>6</sup>

#### 5.4 Kuplatyypin varmentaminen

Edellä mainituista kuplatyypeistä kaikki paitsi kontaminaatiosta johtuvat kuplat voidaan varmentaa bake-testillä.<sup>6</sup> Bake-testin tarkoituksena on mitata laminoituneen lasin lämmönkestävyyttä korkeissa lämpötiloissa. Testissä laminoituneesta lasista leikattua koepalaa poltetaan uunissa viidessä eri lämpötilassa eri mittaisissa sykleissä.<sup>7</sup> Lämmityksen jälkeen voidaan havaita kuplien kasvavan ja mahdollisesti muodostuvan myös samankaltaisia uusia kuplia. Jos syntyneet kuplat ovat ulkonäöltään samanlaisia kuin alkuperäinen niin voidaan olettaa, että kuplat ovat muodostuneet samasta syystä.<sup>6</sup>

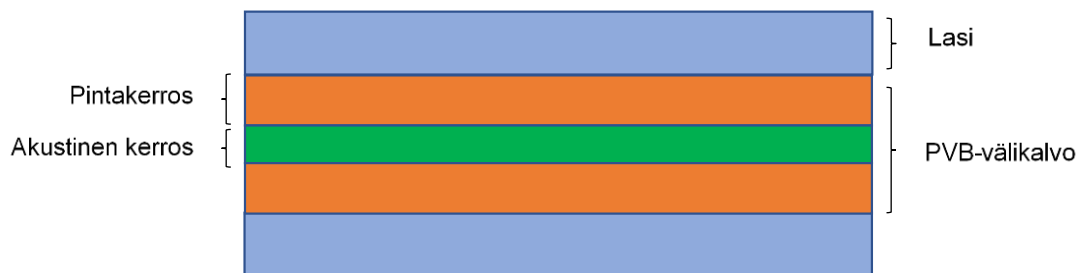
Bake-testiä tehdessä PVB-kalvo saattaa kutistua, mikä johtuu lasien ja kalvon välisestä huonosta adheesiosta. Tähän kiinnitetään huomiota etenkin, jos lasissa on havaittavissa sameita kuplaryhmiä. Jos epäillään, että kuplat ovat kosteuden aiheuttamia, on bake-testin lisäksi koepalasta mitattava kosteuspitoisuus.<sup>6</sup>

#### 5.5 Kuplan vaikutus loppukäytössä

Kuplasta on yleensä vain visuaalinen haitta loppukuluttajalle. Tuulilasikomposiitin reagoiessa ympäristön olosuhteisiin se saattaa vaikuttaa kuplaan aiheuttaen vielä

suuremman ulkonäöllisen haitan. Tämän on tyypillistä esimerkiksi käytettäessä ääneneristysominaisuuksiltaan tehokkaampaa akustista välikalvoa. Tuulilasin lämmitessä olemassa oleva kupla saattaa laajeta. Laajenemisen yhteydessä kupla tunkeutuu PVB-kalvon pinnan läpi sen akustiseen kerrokseen. Kuvassa 12 nähdään akustisen kerroksen olevan keskimmäinen kolmikerroksissa kalvossa. Akustinen kerros on kalvon pintakerrosta pehmeämpää ja siksi kuplan laajentuminen helpottuu.<sup>8</sup>

Kyseinen muutos on kupla, joka on laajentunut kalvon rakenteessa. Ilmiötä kuitenkin kutsutaan nimellä ice flower tai snow flake (jääkukka tai lumihiutale), koska se näyttäytyy kompositissa ulkonäöltään jäätyneenä kaltaisena muutoksena. Tyypillisesti ilmiö alkaa ensin yhdestä pienestä normaalin näköisestä kuplasta, joka myöhemmin olosuhteiden vaikutuksesta leviää vähitellen kooltaan suuremmaksi.<sup>33</sup> Tällöin muutokset tuotteessa aiheuttavat sekä visuaalisen että rakenteellisen haitan.<sup>8</sup>



Kuva 12. Tuulilasin rakenne, joka sisältää akustisen kalvon.

## 6 PROSESSIVAIHEIDEN VAIKUTUKSET KUPLAN MUODOSTUMISELLE

Tässä osiossa käydään läpi kuplan muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä prosessivaiheittain sekä niiden ennaltaehkäisy- ja korjaustoimenpiteitä. Kontaminaatoriskiä voidaan ehkäistä yleisellä siisteyden ylläpidolla sekä oikeanlaisilla työskentelytavoilla. Huolellinen työskentely, stabiilit olosuhteet sekä oikeanlaiset työvälineet ovat usein ratkaisu muiden kuplatyyppien ehkäisemiseksi.

### 6.1 Tasolasi

Työstettävä raakalasi itsessään saattaa sisältää mikroskooppista epätasaisuutta, mikä mahdollistaa ilmataskujen muodostumisen lasilevyjen väliin.<sup>8</sup> Heikkolaatuisempi raaka-aine jättää prosessille vähemmän toleransseja. Tähän pystytään vaikuttamaan valitsemalla luotettavia materiaalitoimittajia, sekä seuraamalla raaka-aineiden laatua esimerkiksi tekemällä auditointeja kyseisille yhteistyökumppaneille. Raaka-aineiden tasalaatuisuuden varmistamiseksi tulee suorittaa säännöllisesti myös omatoimista laadunmittausta.

### 6.2 Leikkuu

Lasit tulee leikata tarkasti mittojen mukaan, jotta lasiparit sopivat kooltaan toisiinsa nähden mahdollisimman hyvin. Tämä varmistetaan leikkausautomaatin terän kulumisen jatkuvalla seurannalla ja tarvittaessa vaihtamisella. Myös tuotekohtaisen leikkausohjelman oikeanlaisuus tulee varmistaa ennen leikkaamisen aloittamista. Leikkuupaineen säädöllä voidaan hallita terän lasiin kohdistuvan voiman määrää, mikä vaikuttaa lasiin muodostuvien viiltojen syvyyteen ja tätä kautta irrottamisen sujuvuuteen.

Leikkuuhenkilöstöllä on vastuu lasin irrottamisen onnistumisesta. Irrotuksen epäonnistuminen aiheuttaa muutoksia lasin ja lasiparin mittasuhteissa. Näitä muutoksia ei välttämättä pystytä korjaamaan hionnalla. Irrotuksen epäonnistuttua lasin reunaan saattaa syntyä reunalohkeamia kuten hionnassakin. Myös poraamisessa saattaa syntyä reunalohkeamia. Tämä aiheutuu poranterän tuottamasta laadusta sekä lasin sisäisten



tai ulkoisten jännitysten purkautumisesta porauksen aikana. Reunalohkeamat mahdollistavat ilman tunkeutumisen lasin ja kalvon väliin autoklaavauksen jäädytysvaiheen paineen päästön aikana.

Hionnan laatu vaikuttaa työstettävän lasin pituuteen. Lasia hiottaessa manuaalisesti nauhahiomakoneella hionnan laatu saattaa vaihdella. Laadunvaihtelu näkyy pieninä reunalohkeamina. Tämä saattaa aiheuttaa lasien rikkoutumisen herkemmin myöhemmissä prosesseissa sekä edistää kuplan muodostumista. Hiomakoneen nauhan kulumista on seurattava jatkuvasti ja se on vaihdettava tarvittaessa.

CNC-hiotut lasit ovat nauhahiomakoneella hiottuihin verrattuna tasalaatuisempia, mikä helpottaa jatkokäsittelyä. Hiomakoneen hiomakiven kulumisesta syntyvä vällys hiomakiven ja lasin välillä tulee varmistaa säännöllisesti, jotta lasisarjojen hionta on tasalaatuista. Hiomakivi tulee valita oikein sekä vaihtaa tarvittaessa. Symmetrisen hiontajäljen varmistamiseksi tulee hiomakiven vaihdon jälkeen tarkistaa sen korkeus lasin reunaan nähden. Hiomakiven korkeutta säädetään tarvittaessa hiomajäljen mukaisesti pystysuunnassa.

CNC-hiontaa käytettäessä on tärkeää, että lasi keskitetään keskityspöydälle oikein, jotta siirtorobotti siirtää lasin oikeassa asennossa hiomakoneeseen. Hionnan laadun varmistamiseksi lasin on oltava oikeassa asennossa ja oikeassa kohdassa hiontaohjelman alkaessa.

Leikkuu-, irrotus- sekä keskityspöydän puhtaus tulee varmistaa säännöllisellä imuroinnilla mahdollisten lasisirpaleiden vuoksi. Sirpaleet voivat aiheuttaa naarmuja, jotka mahdollistavat kuplien muodostumista myöhemmissä työvaiheissa. Kuljetinrullien sekä pesukoneen osien puhdistaminen ja niiden tuotetta vahingoittamaton toiminta tulee varmistaa jatkuvalla seurannalla sekä tarvittavilla ennakkohuolloilla ja korjaustoimenpiteillä. Myös eri nostimien, siirtorobotin ja CNC-hiomakoneen tartuntaimukuppien tuotetta vahingoittamaton toiminta tulee varmistaa puhdistamalla imukupit tarvittaessa. Pesukoneen käydessä on sen harjojen toimintakorkeus säädettävä työstettävän lasin paksuuden mukaan. Myös käytettävän pesuveden lämpötila tulee varmistaa pesukoneen näytöltä tuotannon alkaessa sekä tarkistaa ajoittain. Näin varmistetaan mahdollisimman hyvä pesutulos.

Pölytyksessä piimaapöly-vesi seoksen on oltava koostumukseltaan tasalaatuista, jotta se ei aiheuta lasien väliin kokkareita. Tämä tulee varmistaa seoksen oikeanlaisella suhteella ja riittävällä sekoittamisella. Sekoitusastia tulee pitää suljettuna, jotta seokseen

ei joudu sinne kuulumatonta ainetta. Jos pölytys ei ole tasainen tai riittävä tulee lasi pölyttää uudelleen.

Pölytyksen aikana saattaa pölykaapin seinämille jäädä liuosta, joka kertyessään saattaa valua seinämää pitkin ja tippua lasin päälle. Jos tätä ei huomata ja lasia ei kuivata ennen kuin lyhyempi lasi lasketaan tämän päälle, liuoksen pisarat ja mahdolliset pölykokkareet mahdollistavat myöhemmissä työvaiheissa kuplan syntymisen. Esimerkiksi taivutuksen aikana liika piimaapöly saattaa aiheuttaa poikkeaman lasien muodossa toisiinsa nähden tai kosteaksi jäänyt piimapöly saattaa palaa kiinni lasiin. Tämän vuoksi seinämien pinnalle kertyneen liuoksen valuminen on estettävä pölytyksen paineen säätämällä sekä pyyhkimällä kaapin seinämät tarvittaessa lastalla.<sup>10</sup>

### 6.3 Taivutus

On havaittu, että kuplia muodostuu useimmiten lasin päätyihin. Mitä jyrkempi tuotteen taipuminen on päädyistä, sitä herkemmin tuotteeseen tulee kuplia. Taivutuksessa lasien välinen poikkeama on minimoitava mahdollisuuksien mukaan oikeanlaisella jäähdytyksellä sekä estämällä lasien liikkuminen taivutuksen aikana. Jos taivutuksen aikana jäähdytys aloitetaan liian aikaisin tai suoritetaan liian nopeasti, lasin reunat saattavat aueta irti toisistaan. Tällöin laseja ja kalvoa ei saada laminoinnissa tiivistettyä toisiinsa. Sama ongelma saattaa ilmetä, jos päällimmäinen, eli lyhyt lasi, pääsee liikautumaan taivutuksen aikana.<sup>10</sup>

Kaikki lasiparien yhteneväisyyden poikkeamat, jotka ylittävät 0,2 mm mahdollistavat todennäköisen kuplien syntymisen.<sup>27</sup> Poikkeaman ja sen aiheuttamien kuplien syntymisen ehkäisemiseksi taivutuksen aikana on estettävä lasiparien erottuminen toisistaan. Liiallinen lämpö ja taivutuksen pakottaminen voi aiheuttaa pientä aaltoilua sekä alemman lasin hallitsematonta taipumista. Alemman lasin karkaamien eli hallitsematon taipuminen päällimmäisen alta aiheuttaa liiallista poikkeamaa lasiparien välille.<sup>10</sup>

Ennen taivutusta lasit tarkistetaan mahdollisilta leikkuu virheiltiltä. Jos lasiparissa ilmenee selviä leikkausvirheitä tai pölytys- ja silkkipainovirhettä lasiparia ei taivuteta turhaan, vaan virheistä ilmoitetaan leikkuuseen ja reagoidaan tapauskohtaisesti korjaamalla virhe tai hävittämällä kappaleet.

Ennakkohuollossa taivutusmuotit on huollettava säännöllisesti, jotta vältetään mahdollisilta lasiin muodostuvilta painaumuilta. Painaumia estävät myös muotin teippaukset, pahvi- ja korkkialustat.

#### 6.4 PVB-kalvon säilytysolosuhteet

PVB-kalvot säilytetään 6–8 °C:n lämpötilassa, jotta kalvolle ei muodostu kosteutta tai sen ominaisuudet eivät muutu. Korkein säilytyslämpötila kalvolle on 10 °C. Kalvorullan alumiinipakkaus tulee pitää suljettuna ja rikkoutumattomana kalvorullan käyttöön asti. Säilytyslaatikoita saa varastoida ainoastaan kaksi päällekkäin. Pakkauksen ilmapuodot on tarkistettava ennen kalvon käyttöä. PVB-rullan voi ottaa pakkauksesta ulos aikaisintaan 24 h ennen käyttöä.<sup>8</sup>

Ohuemman 0,38 mm paksuisen kalvon kosteuspitoisuuden muutos tapahtuu paksumpaa 0,76 mm paksuista kalvoa nopeammin. Esimerkiksi kalvojen säilytyslämpötilan ollessa 20 °C sekä suhteellisen ilmankosteuspitoisuuden ollessa 90 %, ohuemman kalvon kosteuspitoisuuden muutos normaalista noin 0,4 %:sta 1 %:iin tapahtuu noin kolme kertaa paksumpaa kalvoa nopeammin. Tämän vuoksi ohuempi kalvo reagoi herkemmin kuljetus- ja säilytysolosuhteiden muutoksiin. Kosteus heikentää PVB-kalvon ja lasin välisiä vetysidoksia sitoutumalla niiden vetyatomeihin. Tämä heikentää materiaalien välistä adheesiota ja aiheuttaa tuotteeseen kuplia.<sup>8</sup>

#### 6.5 Laminointi

Kontaminaatoriskin minimoimiseksi laminointitila tulee olla puhdastila, jossa on olosuhteet stabiilina pitävä LVI-järjestelmä. Tilan siisteydestä ja laitteiden puhtaudesta huolehditaan oikeanlaisilla työskentelytavoilla ja puhdistusmenetelmillä. Kulku puhdastilaan olisi rajattava vain antistaattiseen työasuun sekä hiussuojaan pukeutuneille. Puhdastila-asujen käyttöä muissa tiloissa tulisi välttää ja ne tulee pestä säännöllisesti tai vaihtaa tarvittaessa.

Lasit tulee imuroida ennen laminointia huolellisesti, jotta piimaapöly saadaan poistettua kokonaan sekä muut mahdolliset lasien väliin päässeet partikkelit. Vain puhtaat lasit ja kalvot tulee yhdistää tuotteen laadun varmistamiseksi sekä kontaminaatoriskin minimoimiseksi.

Valmistettaessa lämmitettäviä välikalvoja tulee kalvot leikata etukäteen, jotta ne saavuttavat vähintään kahdeksan tunnin elpymisajan ennen laminointia. Niiden määrä tulee myös optimoida tarpeen mukaisesti.<sup>8</sup>

Kun kalvo asetetaan lasin päälle, on varmistuttava, ettei kalvo taitu tai rypisty. Taitosten ja ryppyjen alle jäävä ilma antaa mahdollisuuden kuplan muodostumiselle. Ryppyjen ehkäisemiseksi tulee keskittämisen jälkeen välttää PVB-kalvon kulmien tai reunojen venyttämistä. Ylimääräinen kalvo tulee poistaa reunoilta leikkaamalla se oikeaan pituuteen. Näin mahdollistetaan komponenttien laadukas saumautuminen. Lasiparin keskitys toisiinsa nähden tulee suorittaa mahdollisimman tasaisesti vastaamaan taivutuksessa saavutettua asetelmaa.<sup>8</sup>

Laminoinnin jälkeen lasin ympärille asetettava imuletku tulee tukea työohjeen mukaisesti asettamalla sen kulmiin ja reunoihin pyykkipoikamaisia nipsuja. Näin varmistetaan letkun kiinnipysyminen ja imun ylläpitäminen.

Mitä suurempi alipaine on ja mitä pidemmän ajan lasia pidetään alipaineessa, sen parempi tiiveys saadaan aikaan. Alin suositus kylmäimun paineelle on 0,8 baria. Suositeltu vähimmäisaika kylmäimulle on 30 min. Lasin, PVB-kalvon ja vakuumiletkujen lämpötilan suositellaan olevan alle 30 °C.<sup>8</sup> Yli 45 °C:n lämpötila aiheuttaa reuna-alueen ennenaikaisen sulkeutumisen, jolloin ilma ei pääse poistumaan lasien välistä.<sup>10</sup> Kylmäimun paineen on saavutettava 0,9–1,0 baria. Autoklaavauspukkeja siirrettäessä siirtovaunulla tulee välttää nopeita liikkeitä ja nytkähdyksiä, jotta imuletkut eivät irtoa kuljetuksen aikana.<sup>9</sup> Autoklaavauspukkeja siirrettäessä on ylläpidettävä pukkien kautta kulkeva imu liittämällä autoklaavauspukki alipaineverkosta lavansiirtotrukin alipaineyksikköön. Autoklaavauspukin venttiilien hanat tulee avata ja sulkea oikeassa järjestyksessä imun ylläpitämiseksi.

Imuletkut kuluvat käytössä ja niistä voi irrota käytössä partikkeleita. Siksi imuletkut ovat potentiaalinen kontaminaation lähde. Myös letkujen lasia vasten olevaan sisäosaan saattaa joutua sinne kuulumattomia partikkeleita. Liitettäessä imuletku lasin reunoille nämä partikkelit pääsevät letkun sisäosan kautta lasien väliin. Imuletkut likaantuvat pakkaamossa, jossa letkut irrotetaan lasin reunoilta autoklaavauksen jälkeen. Letkut jäävät autoklaavauspukkien purkamisen ajaksi lattialle, jossa ne altistuvat kontaminaatioille ja kulumiselle.

Laminoinnissa käytettävät imuletkut ovat materiaaliltaan silikonia.<sup>10</sup> Kontaminaatoriskin pienentämiseksi nämä imuletkut voitaisiin korvata eteenipropeenidieeni-kumista

(EPDM) valmistetuilla letkuilla, mitkä eivät jätä silikonijäämiä lasien pintaan.<sup>20,22</sup> EPDM-letkun käytön haasteena on kuitenkin sen joustamattomuus. Tämän vuoksi letkun käyttäminen vaatisi yksilölliset letkut jokaiselle tuotteelle.<sup>10</sup>

Laminoinnissa käytettävät suojakäsineet sisältävät myös silikonia, joiden on havaittu jättävän jälkiä lasin pintaan etenkin käsineiden ollessa uusia. Jäljen jäädessä lasin sisäpintaan sitä ei voida enää korjata laminoinnin jälkeen. On havaittu, että käsineiden kuluessa ja hieman tahraantuessa lasin pintaan ei jää niin helposti jälkiä, mutta se ei silti pienennä kontaminaation riskiä.

## 6.6 Autoklaavausprosessi

Autoklaavausprosessin sykli ja niiden olosuhteet tulee pitää samanlaisina joka autoklaavauskerralla kuplien muodostumisen ehkäisemiseksi sekä mahdollisten prosessivirheiden jäljittämiseksi.

Autoklaavausprosessissa saattaa muodostua kuplia, kun paine komposiitin ulkopuolella on pienempi kuin lasien välissä, PVB-kalvon ollessa vielä pehmeää. Tällöin kalvon ja lasin väliin saattaa tunkeutua ilmaa, joka muodostaa kuplia. Kuplia muodostuu, kun komposiittiin kohdistuva paine laskee kalvon ollessa vielä pehmeää. Tällöin kalvon paine ylikyllästyy saaden aikaan ilman laajenemisen. Laajentunut ilma muodostaa kuplia, etenkin lasin reunoille.<sup>8</sup>

Jos lämmityssyklin aikana paineen nosto on liian hidas, puutteellisesti tiivistettyjen reunojen välistä saattaa päästä tunkeutumaan ilmaa PVB-kalvon ja lasin väliin. Pitösyklin tulee olla 20–40 min. Pitösyklin kestäessä pidempään kuin 40 min saattaa ilmaa absorboitua ja liueta enemmän PVB-kalvoon. Jäähdytysvaiheessa lämpötilan tulee olla ennen autoklaavin paineen poispäästöä alle 45 °C, jotta mahdollisesti jäljelle jäänyt kosteus poistuu lasien välistä.<sup>8</sup>

Liitettäessä autoklaavauspukki autoklaavin imulinjaan teräskudosletkulla on varmistuttava siitä, että letku kiinnitetään pukkiiin ja pukissa oleva venttiilin hana avataan. Vasta tämän jälkeen voidaan sulkea lavansiirtotrukin imuletkun hana ja irrottaa letku. Jokainen pukki tulee tarkistaa autoklaavissa niin, että teräskudosletku on kunnolla kiinni liittimessä sekä imulinjan ja imuletkujen hanat ovat varmasti auki sekä ettei vuotoja ilmene.

Ennakkohuollolla voidaan varmistua, että autoklaavi on puhdas ja se toimii tasaisesti. Mahdolliset letkuvuodot on paikattava, jotta imu saadaan ylläpidettyä koko autoklaavauksen ajan. Kondensoitunut kosteus on kuivattava ja mahdollinen irtonainen lika on imuroitava, jotta vältetään autoklaavauksen aikaisilta kontaminaatioilta ja imuletkujen likaantumiselta.

## 6.7 Lopputarkastus

Pakkaamossa suoritettavassa lopputarkastuksessa käydään läpi jokainen tuote ja tehdään tarvittavat tarkastustoimenpiteet ennen pakkausta ja lähetystä. Tässä vaiheessa, jos tuotteessa ilmenee kuplia, tehdään päätös tuotteen uudelleen autoklaavoinnista. Uudelleen autoklaavauksessa tuote autoklaavataan ilman imua. Lasin reunoille asetetaan nipsuja reunojen ympärille silmämääräisesti tasaisten välimatkojen päähän toisistaan. Kaarikohtiin ja kuplien kohdalle nipsuja asetetaan tiheämmin. Jos kupla on muodostunut kauas lasin ulkoreunasta nipsut eivät auta. Uudelleen autoklaavauksessa voidaan kupla-alueen kohdalle asettaa nipsujen lisäksi myös kumilistoja, jotka kiristetään kiinni lasin pintaa vasten nipsuin. Näin saavutetaan puristukseltaan vahvempi ja laajempi alue.

## 6.8 Kuplan muodostumisen ennaltaehkäisy 5S-toimintaperiaatteella

5S-toimintaperiaatteella voidaan ehkäistä kontaminaatiosta johtuvia kuplia sekä helpottaa prosessin ongelmakohtien havaitsemista. Toimintaperiaate asettaa tuotantotiloille yhtenäisen siisteysstandardin huomioiden yksittäisten työpisteiden tarpeet. Näin työpisteeltä toiselle siirryttäessä on helpompi toteuttaa alueella vaadittavaa järjestystä.

5S-toimintaperiaate on japanilaisen Hiroyuki Hiranon kehittämä viiden osa-alueen tuotantotilan organisointimenetelmä, jonka tavoitteena on lyhentää läpimenoaikaa. 5S-toimintaperiaatteen tarkoituksena on päästä eroon tuotantotilaan kuulumattomista tavaroista sekä helpottaa pitämään tarpeelliset tavarat helposti saatavilla. Samalla työympäristön siisteyden ja järjestyksen ylläpito helpottuu. Toimintaperiaatteen mukaisesti tuotantolinjalta poistetaan kaikki sillä hetkellä työtehtävän suoriutumiseen tarpeeton ja ylimääräinen esineistö. Esimerkiksi tarpeettomat työkalut, laitteet ja koneet sekä ylimääräiset materiaalit siirretään pois tieltä niille osoitetuille paikoille. Työlle

tarpeelliset välineet järjestetään käytölle helpoksi ja tarvittaessa puhdistetaan työalue sekä käytetyt välineet. Käyttöänoton yhteydessä toimintaperiaate standardisoidaan, jonka jälkeen sitä voidaan hyödyntää osana jokapäiväistä työskentelyä.<sup>32</sup> 5S-toimintaperiaatteen nimi tulee viidestä japanilaissanasta, jotka alkavat s-kirjaimella. Näille on myös englantilais- sekä suomalaisvastineet ja ne jaetaan viiteen eri osa-alueeseen seuraavasti:

#### 1. Selvitä

Selvittämisessä lajitellaan välineet, joita ei tarvita tehtävään työhön. Lajittelu huomioidaan etenkin 5S-toimintaperiaatteen käyttöänoton yhteydessä, mutta se tulee huomioida myös esimerkiksi työmenetelmien muuttuessa tai välineiden ja materiaalien vaihtuessa.<sup>32</sup>

#### 2. Säilytä

Säilyttämisellä huomioidaan välineiden käytön tehokkuus, turvallisuus sekä ergonomia. Työhön tarvittaville välineille merkitään tunnistettavat säilytyspaikat, jolloin välineet löydetään helposti ja niiden laittaminen pakoilleen koetaan vaivattomaksi. Riittävä järjestys takaa osien ja materiaalin mahdollisimman esteettömän ja nopean noutamisen.<sup>32</sup>

#### 3. Siivoa

Siivoamalla tuotantoalue ja käytettävät välineet liasta ja pölystä ylläpidetään tilojen siisteyttä sekä välineiden toimintakykyä. Myös työkohteeseen tarvittavat työvaatteet ja suojavälineet on puhdistettava työkohteen tarpeen mukaan.<sup>32</sup>

#### 4. Standardoi

Tuotantotilalle on luotava tietty standardi eli tavoitettava siisteystaso. Tästä siisteyden tasosta luodaan visuaalinen tai muuten selkeä kuvaus, mikä sijoitetaan kyseiseen tilaan helposti nähtäville. Tilan tavoitesiisteystestä voidaan ottaa esimerkiksi valokuva, jonka mallin avulla tila tulee järjestää. Järjestyksen toteutumista voidaan helpottaa myös informaatiotarroin ja rajaamalla teipein alueita, johon tavarat tulee sijoittaa.<sup>32</sup>

#### 5. Seuraa

Seuranta tarkoittaa käyttöänotetun toimintaperiaatteen jokapäiväistä ylläpitämistä ja sen jatkuvaa parantamista. Seuranta on sitoutumista, joka mahdollistaa muiden osioiden onnistumisen.<sup>32</sup>

### Suojelu, turvallisuus

Suojelu eli turvallisuus ei kuulu varsinaiseen 5S-toimintaperiaatteeseen, mutta se on ominaisuus, joka muodostuu muiden osioiden toteutuman ohella. Se itse ei vaikuta tuotteeseen, mutta toimintaperiaatteen käyttö ja sen jatkuva parantaminen saattaa helpottaa prosessin ongelmakohtien havaitsemista.<sup>32</sup>



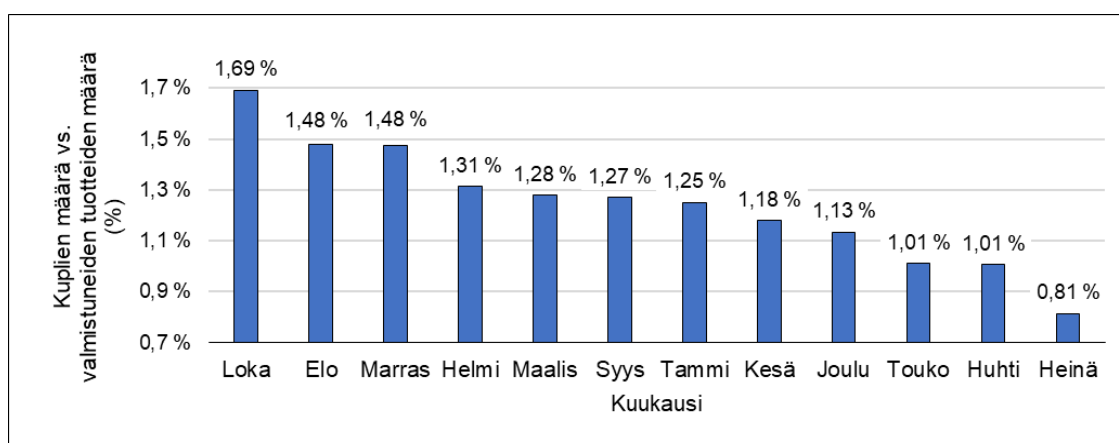
## 7 PROSESSIPARAMETRIEN SEKÄ MATERIAALIEN TUTKIMUS JA ANALYSOINTI

### 7.1 Kuplien määrät vuodenajoin

On epäilty, että kuplia syntyy enemmän tiettyinä vuodenaikoina. Epäilyksenä on ollut, että kuplia syntyy eniten kosteampien kevät- ja syyskuukausien aikana. On mahdollista, että etenkin vaiheessa, jossa taivutetut lasiparit odottavat pukeilla laminointia, niiden pinnoille ja väliin tiivistyy tuotantotilassa olevaa kosteutta. Tämä kosteus siirtyy lasien mukana laminointitilaan, jossa se jää liitettävien komponenttien väliin aiheuttaen riskin kuplan muodostumiselle. Lasiparien odotusaika pukeilla voi olla useita päiviä, minkä aikana sääolosuhteet voivat vaihdella vaikuttaen tuotantotilan olosuhteisiin.

Yrityksen keräämästä datasta pystyttiin laskemaan lasien määrä, joissa havaittiin olevan kuplia, suhteutettuna valmistuneiden tuotteiden määrään. Tulokset pystyttiin määrittämään kuukauden tarkkuudella vuoden 2008 joulukuusta vuoden 2018 joulukuuhun.

Kuvion 2 osoittaman datan mukaan syyskuukausina on muodostunut eniten kuplia. Kuitenkin vähiten kuplia havaitaan kevätkuukausina. Yksittäisistä kuukausista lokakuussa on havaittu kuplia enemmän kuin muina kuukausina. Vähiten kuplia havaitaan heinäkuussa.



Kuvio 2. Havaitut kuplat valmistetuissa kappaleissa kuukausittain ajanjaksolla joulukuu 2008 – joulukuu 2018.

Autoklaavin kosteuden mittausten yhteydessä seurattiin myös vertailutilan eli tuotantotilan olosuhteita. Taulukosta 1 voidaan huomata kuinka olosuhteet vaihtelevat kuukausien välillä. Tammikuun suhteellisen kosteuden mittauksissa havaitaan matalampia arvoja kuin muiden kuukausien arvoissa. Olosuhteiden keskiarvoissa ei ole suurta vaihtelua kuukausien välillä, mutta kuukausittaiset kosteuspitoisuuden ja lämpötilan selkeät vaihtelut voidaan havaita kuukausien pienimmän ja suurimman mittausravon erotuksena. Esimerkiksi maaliskuun lämpötilamuutokset ovat selvästi hillitympiä kuin muiden kuukausien.

	Suhteellisen kosteuden keskiarvo (%)				Lämpötilan keskiarvo (°C)			
	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti
Pienin	13,9	12,9	12,3	15,3	20,9	22,1	22,4	19,5
Suurin	18,0	22,6	18,6	23,1	27,7	28,0	25,3	26,0
Erotus	4,1	9,7	6,3	7,8	6,8	5,9	2,9	6,5
Keskiarvo	16,7	18,2	18,8	18,3	22,9	24,9	23,8	23,3
Keskihajonta	1,2	2,6	1,3	2,1	2,2	1,6	0,9	2,2

Taulukko 1. Tuotantotilan olosuhteiden mittaustulosten vertailu mittausajanjaksolla kuukausittain.

Eri vuodenaikojen väliset sääolosuhteiden muutokset mahdollisesti edesauttavat kuplien syntymistä. Tätä tulisi tutkia säännöllisin mittauksin eri puolilla tuotantotilaa vuoden ajan, jotta saataisiin tarkempaa tietoa hallin olosuhteista ja niiden muutoksista. Tämä voitaisiin suorittaa eräänlaisilla sääasemilla, jotka pystyvät mittaamaan tilan kosteutta, lämpötilaa ja ilmanvirtausta. Ilmavirtauksen mittaaminen antaisi tietoa, kuinka tuotantotilan halliovien hetkelliset avautumiset ja sulkeutumiset vaikuttavat tilan olosuhteisiin.

## 7.2 Autoklaavin kosteuden seuranta

Autoklaavin kosteuspitoisuutta seurattiin opinnäytetyön aikana, niin että autoklaavausprosessin loputtua mitattiin kosteusmittarilla autoklaavista vapautuvan ilman kosteus ja sen lämpötila. Mittaus suoritettiin välittömästi autoklaavin ovea avattaessa. Saatuja arvoja verrattiin vertailuarvoihin, jotka olivat tuotantotilan olosuhteet. Näin pystyttiin selvittämään, onko autoklaaviin jäänyt ylimääräistä kosteutta. Mittaukset suoritettiin päivävuoron aikana kello seitsemän ja puoli neljän välillä. Mittauksia

suoritettiin 61 kappaletta aikavälillä 8.1.-18.4.2019. Taulukosta 2 voidaan havaita, kuinka suurta vaihtelua on autoklaavin sekä tuotantotilan olosuhteiden arvoissa.

	Autoklaavin suhteellinen kosteus (%)	Autoklaavin lämpötila (°C)	Hallin suhteellinen kosteus (%)	Hallin lämpötila (°C)
Pienin	6,8	23,7	12,3	19,5
Suurin	18,6	30,3	25,3	28
Erotus	11,8	6,6	13	8,5
Keskiarvo	12,5	27,9	18,0	23,7
Keskihajonta	2,5	1,5	3,0	1,9

Taulukko 2. Autoklaavausprosessin olosuhteiden mittaustulosten vertaaminen hallin olosuhteisiin.

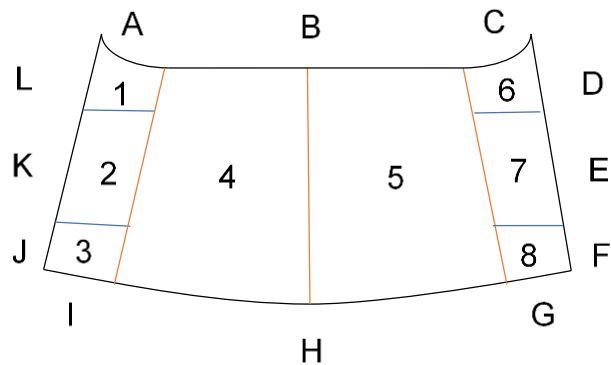
Mittausajanjaksolla autoklaavin kosteus ei ylittänyt vertailuarvoja. Voidaan todeta, että autoklaavauksen jäähtyysyys on tältä osin toimiva ja että kuplien muodostuminen ei johdu autoklaavausolosuhteiden liiallisesta kosteudesta.

Mittaustuloksista havaittiin ajanjakso, minkä aikana mittaustulokset olivat keskiarvoa suurempia. Tämä normaalia suurempi kosteuspitoisuus saattoi vaikuttaa kuplien syntymiseen. Ajanjakson aikana autoklaavin kuivatuslaitteen huomattiin olevan virheellisesti pois päältä kuukausihuollon jälkeen. Ajanjakson aikana koepaloissa havaittiin kuplia. Koepalat ovat suoraa suorakaiteen muotoisia kappaleita, joihin ei pitäisi muotonsa puolesta muodostua kuplia. Tämän ajanjakson mittaustuloksista voitiin todeta, että autoklaavin ilmankosteus vaikuttaa kuplien muodostumiseen.

### 7.3 Kuplien seuranta pakkaamossa

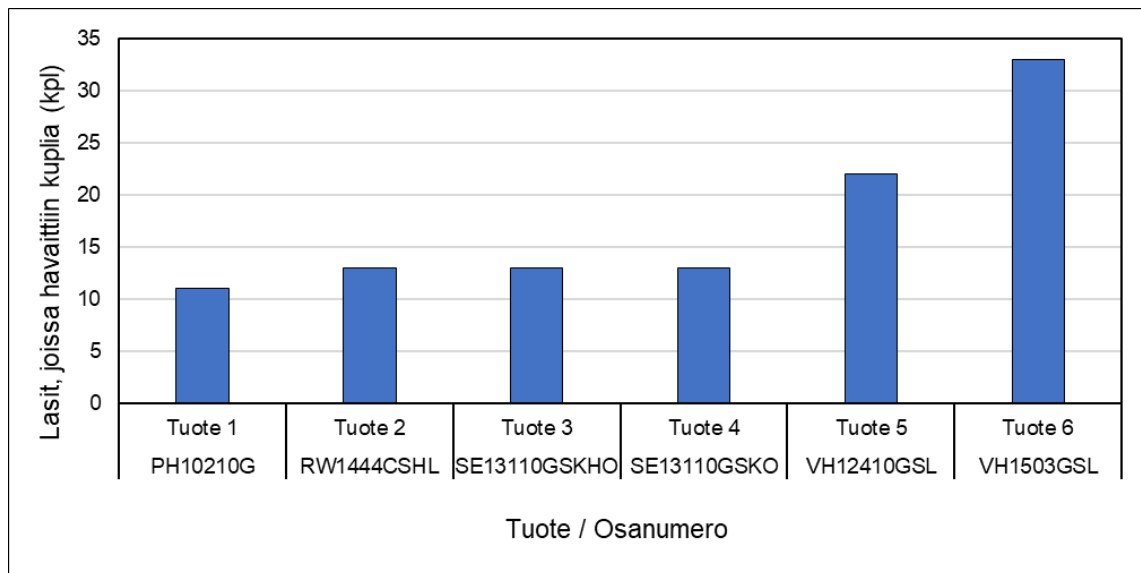
Pakkaamossa seurattiin opinnäytetyön aikana havaittujen kuplien määrää. Taivutuksessa asetettujen quality control (laadun tarkastus) -tarrojen avulla pystyttiin jäljittämään millä taivutusunilla, minä päivänä sekä kuka kyseisen tuotteen on taivuttanut. Työkortista saatiin tuotteen osanumero, autoklaavointikerran numero ja käytetyn PVB-rullan eränumero. Nämä tiedot kerättiin Excel-taulukkoon. Taulukkoa varten luotiin Kuvan 13 mukainen numerokirjainkoodisto, mikä kuvaa lasin eri alueita. Tämän avulla pystyttiin kartoittamaan muodostuneen kuplan sijainti lasissa. Taulukkoon lisättiin myös virheellisten lasien kappalemäärät, jotta pystyttiin seuraamaan virheellisten

lasien lukumäärää ja hahmottamaan virheominaisuuksien toistuvuutta saman osanumeron lasissa sekä autoklaavauskerrassa.

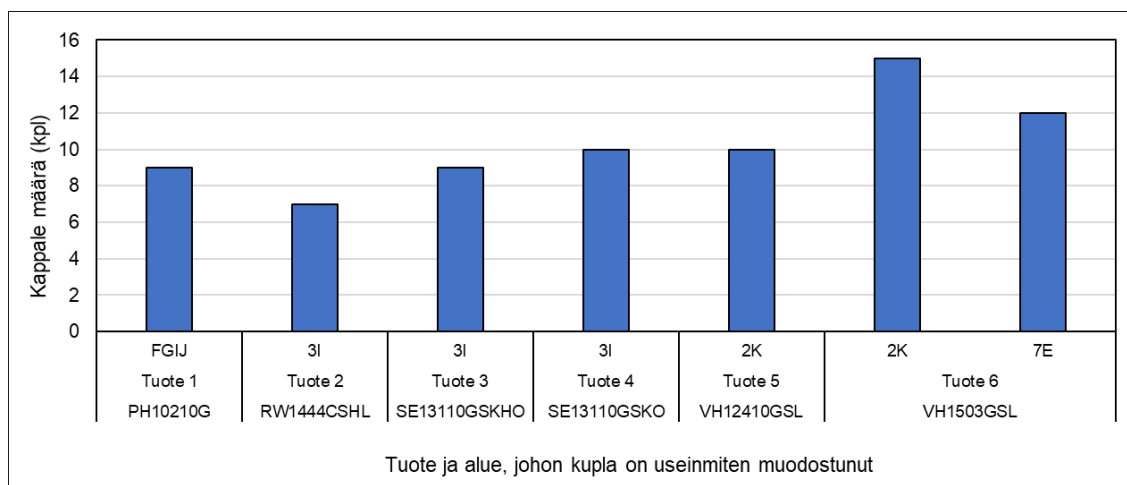


Kuva 13. Tuulilasin tunnisteet.

Tarkkailuajanjakson aikana taulukkoon kertyi lasia 495 kappaletta. Taulukon tietojen analysoinnin haasteena oli eri tuotteiden suuri määrä, 133 tuotetta, mistä johtuen otantaa yhtä tuotetta kohdin saatiin vähän. Kuviossa 3 voidaan havaita tuotteet, joihin kertyi kuplia eniten seuranta-ajanjakson aikana. Kuviossa esitetään tuotteet, joita oli kappalemäärältään kymmenen tai enemmän. Eniten kuplia, eli 33:ssa lasissa, havaittiin tuotteessa 6. Tuotteessa 5 havaittiin kuplia toiseksi eniten, eli 22:ssa lasissa. Tuotteessa 1 kuplia havaittiin 11:ssä lasissa. Tuotteissa 2, 3 ja 4 kuplia havaittiin 13:ssa lasissa.



Kuvio 3. Tuotteet, joissa havaittiin eniten kuplia seuranta-ajanjakson aikana.



Kuvio 4. Tuotteet ja niiden alueet, joissa havaittiin eniten kuplia.

Kuviossa 4 esitetään tuotteet ja niiden alueet, joihin kuplat ovat muodostuneet useimmiten tarkkailuajanjakson aikana. Tuotteessa 1 havaittiin eniten kuplia lasin alakulmissa. Tuotantosarja oli tuotteelle ensimmäinen, joten syy kuplien muodostumisele saattaa olla moninainen eikä siten ole yleistettävissä.

Tuotteessa 2 on paljon kaarevuutta molemmissa reunoissa koko lasin mitalta, mutta kuplia muodostui silti useammin vasempaan alakulmaan. Kuplien muodostumisen syytä on todennäköisesti ollut tuotteen siirtäminen yksittäisuunilta sarjauunille, jolloin taivutussyklin parametrit eivät ole vielä olleet oikeat.

Tuotteet 3 ja 4 ovat samasta lasimallista tehtyjä tuotteita. Molemmissa tuotteissa eniten kuplia on muodostunut vasempaan alakulmaan. Kuplan muodostumisen syytä havaittiin olevan muuttivirhe.

Tuotteessa 5 havaittiin kuplia joka puolella lasia, mutta selvästi eniten vasemmassa reunassa. Kuplat olivat laajoja kupla-alueita, jotka johtuivat autoklaavauksen aikana auenneesta imusta, jolloin lasikomponenttien väliin oli päässyt ilmaa ja kosteutta. Auennut imu aiheutti kuplia myös lasin alareunaan, jossa sijaitsee autoklaavauspukin imuventtiili. Joissain laseissa kuplat olivat pieninä ryhmittymiä lasin reunalla. Nämä ovat saattaneet myös muodostua kosteudesta.

Tuotteen 5 laajoja kuplia ei pystytty korjaamaan uudelleenautoklaavoinnilla. Kuplien välttämiseksi virheeseen tulisi reagoida tarkistamalla autoklaavin imulinjan ja autoklaavuspukkien toimivuus sekä työskentelemällä huolellisesti ja varmistamalla tuotteen laadukas laminoituminen ehkäisemällä kosteuden pääsy komposiitin väliin.

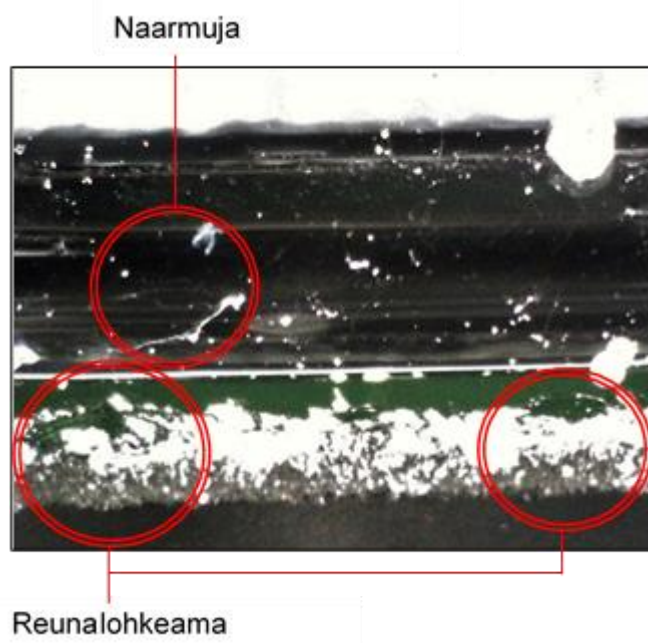
Tuotteessa 6 havaittiin kuplia eniten molemmissa sivuissa. Kuplat olivat aivan lasin reunalla sameina tai hyvin tiheinä kupla-alueina. Kuplat saattoivat muodostua kuplatyyppin mukaisesti komponenttien riittämättömän saumautumisen vuoksi. Kuplia havaittiin myös lasiin porattujen reikien ympärillä, mikä saattoi johtua ilmasta, joka on päässyt tunkeutumaan komponenttien väliin autoklaavauksen aikana. Ilman pääseminen komposiitin väliin on saattanut johtua joko reikien puutteellisesta tiivistämisestä laminoinnissa tai niiden poraamisesta aiheutuneista reunalohkeamista leikkuussa. Tuotteet 5 ja 6 eivät sisällä lisäominaisuuksia kuten antennveja tai lämmityslankoja, mitkä toisivat lisähaasteita valmistukseen tai komponenttien yhdistämiseen.

Tuotteen 6 kuplat pystyttäisiin mahdollisesti välttämään varmistamalla tuotteen laadukas laminoituminen ehkäisemällä kosteuden pääsy komposiitin väliin. Lasiin porattujen reikien kohdalle syntyneet kuplat voitaisiin välttää leikkuussa poranterän laadun varmistamisella sekä laminoinnissa asianmukaisen tiivistysrenkaan asettamisella.

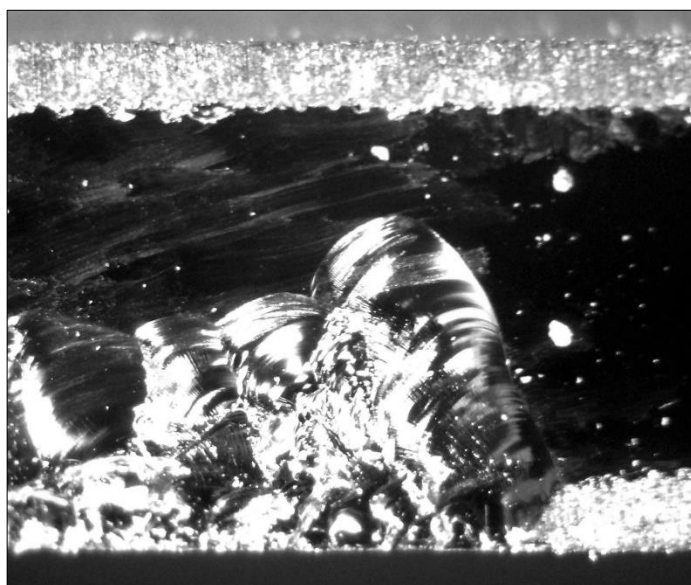
#### 7.4 Hiontajäljen kartoitus

Silmämääräisellä laadunmittauksella voidaan havaita nauhahiomakoneen hiontalaadun olevan heikompaa kuin CNC-hionnan. Heikompi laatu näkyy pieninä reunalohkeamina. Silmämääräisesti voidaan havaita, kuinka CNC-hionta hioi koko lasinreunan mitalta toisin kuin nauhahiomakone.

Nauhahiomakoneen sekä CNC-hiomakoneen hiomalaatua verrattiin mikroskooppikameran avulla. Kuvista 14 ja 15 voidaan nähdä, kuinka nauhahiomakoneen hiomajälki on repivämpiä verrattuna CNC-hiomakoneen hiomajälkeen (Kuvat 16 ja 17). Nauhahiomakoneella hiotuissa lasissa reunalohkeamat ovat syvemmällä lasissa.



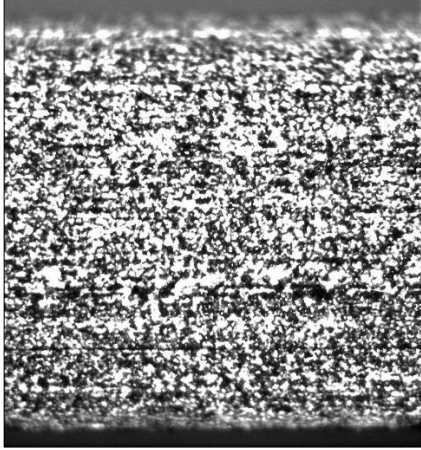
Kuva 14. Suurennos nauhahiomakoneella hiotun lasin hiomajäljistä.



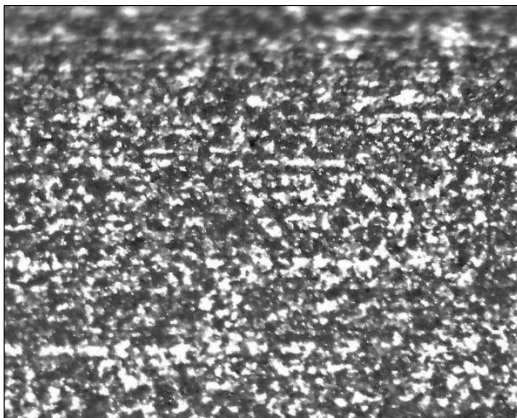
Kuva 15. Suurennos nauhahiomakoneen hiomajäljestä lasin reunasta.

CNC-hionnan hiontajälkeä verrattiin ennen ja jälkeen hiontajäähdytinaineen lisäyksen. Hiontajäähdytinnesteen tarkoituksena on pehmentää hiomakiven jäähdytysvettä sekä tehostaa kiven jäähtymistä. Aineen käyttö vähentäisi hionnassa syntyvien reunalohkeamien määrää.<sup>10</sup> Kuvissa 16 ja 17 ei ole eroa hiontalaadussa. Reunalohkeamaa on CNC-hionnassa aina hieman, mutta normaalista poikkeavaa

reunalohkeamaa ei näkynyt mikroskooppikuvissa. Hiontajäljen ollessa ennestään jo hyvällä tasolla jäähdytinaineen lisäys ei tuonut tämän testin perusteella tuotteeseen merkittävää vaikutusta.



Kuva 16. CNC-hiontakoneen hiomajälki ennen hiontajäähdytinaineen lisäystä.



Kuva 17. CNC-hiomakoneen hiomajälki hiontajäähdytinaineen lisäyksen jälkeen.

### 7.5 Prosessiveden laadunmääritys

Autoklaavin jäädytyksessä käytettyä vettä hyödynnetään pesukoneen pesuvetenä. Tästä lauhdevedestä otettiin näytteet pesukoneen huollon aikana. Ennen huoltoa pesukoneen läpi laseja oli ajettu 4792 kappaletta. Näyte otettiin koneen keskiosan valualtaasta. Toinen näyte otettiin pesukoneeseen menevän veden letkusta. Näyte annettiin analysoitavaksi Lounais-Suomen vesi ja ympäristötutkimus Oy:lle. Määritykset pitivät sisällään pH- ja sähkönjohtavuusmittaukset sekä alkuainepitoisuusanalyysit



seuraavista suoloista: kalsiumkloridi ( $\text{CaCl}_2$ ), magnesiumkloridi ( $\text{MgCl}_2$ ), kaliumkloridi (KCl) ja natriumkloridi (NaCl).

Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oyn tekemän prosessiveden analyysituloksista havaittiin, että hiottujen lasien pesuvetenä käytettävä autoklaavin jäähdytyksessä hyödynnetty lauhdevesi sisältää kaikkia tutkittuja alkuaineita: kaliumia (K), kalsiumia (Ca), natriumia (Na) ja magnesiumia (Mg). Näiden lisäksi vesinäytteestä havaittiin myös rautaa (Fe) sekä kloridia (Cl). Liitteessä 2 on tarkemmin nähtävissä prosessivedestä tutkitut ominaisuudet ja niiden arvot sekä analysoidut alkuaineet ja niiden pitoisuudet.

Sähkönjohtavuus kuvaa veteen liuenneiden suolojen määrää.<sup>24</sup> Suositusarvo pesuveden sähkönjohtavuudelle on  $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ .<sup>8</sup> Vesianalysissä pesuveden tuloveden sähkönjohtavuudeksi mitattiin  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mikä ylittää suositusarvon moninkertaisesti.

Pesuveden laatuun tullaan jatkossa kiinnittämään huomiota, sillä opinnäytetyön aikana tehtiin vesianalysien tulosten pohjalta investointipäätös vedensuodatuslaitteistosta, jolla alihankkijoiden antamat suositusarvot voidaan tavoittaa.

## 7.6 Dowanolin käyttö

Kaupallinen Dowanol TPM eli tripropyleeniglykolimetyylieetteri on valmistettu yli kahdeksan eri isomeerin sekoituksesta. Sitä käytetään polyesterimuovien tuotannossa, koska sillä on korkea polymeerinliuotuskyky. Aineella on myös matala höyrystymisaste, minkä vuoksi sitä käytetään kuulakärkikynien musteissa ja huopakynissä sekä väritynyissä kuivumisen ehkäisemiseksi. Dowanolin kiehumis- ja leimahduspiste on korkea, siksi sitä käytetään uunien puhdistusaineena, runsaspitoisissa massoissa sekä liuotinpohjaisissa pinnoitteissa. Sitä käytetään myös ruosteen, maalin ja lakkojen poistamiseen sekä ruosteenirrotusöljyissä.<sup>26</sup>

Korjausprosessissa, jossa lasit uudelleenautoklaavataan kuplien poistamiseksi, voidaan käyttää Dowanolia PVB-kalvon paisuttamiseksi, mikä edistää kalvon paikkauskykyä. Dowanolia levitetään lasin reunoille ennen autoklaavausta.<sup>27</sup>

Dowanolin höyrystymisaste on matala, mutta autoklaavauksen aikainen lämpötila haihduttaa ainetta. Dowanolin käytön riskinä ovatkin tulipalot, sillä sen leimahduspiste

suljetussa kupissa on 113 °C, kun taas autoklaavauksen aikana lämpötila saattaa nousta yli 150 °C:seen.<sup>28</sup>

Opinnäytteen aikana tehdyissä uudelleenautoklaavaustesteissä käytettiin 97,5 %:sta Dowanolia. Ensimmäisessä testissä puolet normaalin tuotantolasin ylä- ja alapuolen reunoista käytiin läpi Dowanolilla kastetulla kankaalla. Lasin reunoille asennettiin nipsuja vain yksi per sivu. Autoklaavauksen jälkeen PVB-kalvossa ei havaittu muutosta.

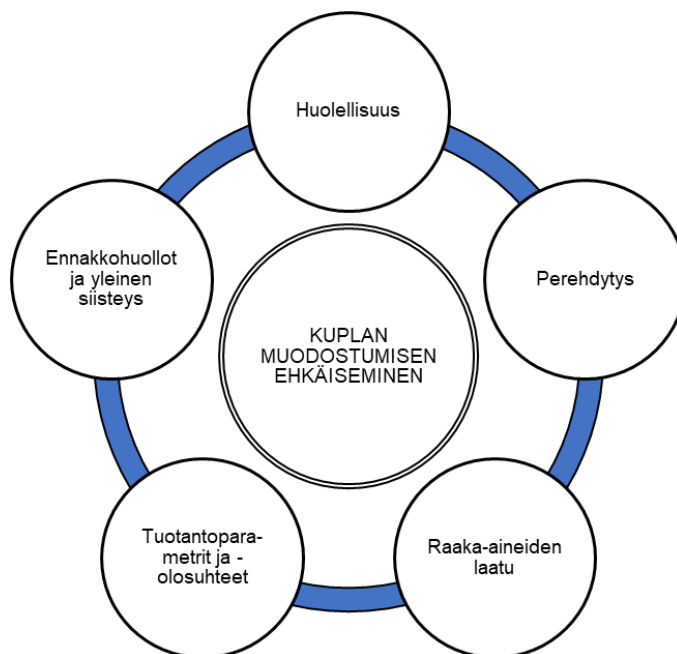
Toisessa testissä Dowanolin määrää lisättiin valelemalla ainetta pensselillä normaalin tuotantolasin reunaan niin, että puolet lasin reunasta oli käsitelty ja puolet ei, jotta nähtäisiin ero kalvon paisumisessa. Lasin reunoille asetettiin normaalia vähemmän nipsuja. Autoklaavauksen jälkeen jotkin nipsuista olivat tarttuneet tiukasti jähmettyneeseen Dowanoliin, mutta selvää paisumista kalvossa ei havaittu. Testin perusteella voidaan todeta, että Dowanol reagoi autoklaavauksen aikana jähmettymällä, mutta selvää paisumista kalvossa ei tapahtunut. Täten selkeää käytännön hyötyä aineen käytöllä tuotteen laadun parantamiseksi ei havaittu näissä testeissä.

## 8 YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, mihin kohtaan lasia ja mistä syystä tai syistä kupla syntyy sekä mihin materiaaliin tai työvaiheeseen virhe voitaisiin jäljittää. Tuotannon kriittiset pisteet selvitettiin prosessikohtaisesti työntekijöiden haastatteluilla ja omakohtaisella prosessin seurannalla. Yrityksen työntekijät olivat asiasta hyvin kiinnostuneita ja jakoivat tietojaan, tekemiään havaintoja sekä mielipiteitään mielellään. Opinnäytetyössä lähteenä käytettiin Sekisui S-lec B.V.:n koulutusmateriaalia. Tämän lisäksi lähteinä hyödynnettiin muiden lasiteollisuuden toimijoiden julkaisemia materiaaleja, tieteellisiä artikkeleita sekä e-kirjoja.

Opinnäytetyötä tehdessä havaittiin, että kuplan muodostumiseen on monia syitä, minkä takia aihetta tarkasteltiin laajalti. Tästä syystä opinnäytetyötä ei voinut rajata yhteen näkökulmaan tai yhden materiaaliin tai tietyn prosessivaiheen tutkintaan. Prosessivaiheita ja siinä käytettyjä materiaaleja tuli tutkia yksi kerrallaan todennäköisimmän kuplan muodostumisen syyn jäljittämiseksi.

Opinnäytetyössä nostettiin esille prosessista monia kuplan muodostumiselle kriittisiä tekijöitä, joista suurin osa pystytään ennaltaehkäisemään yleisellä siisteydellä, huolellisella työskentelyllä sekä ennakkohuolloilla. Nämä voidaan jatkossa varmistaa selkeillä työohjeilla, riittävällä osaamisen varmistamisella eli perehdyttämällä sekä tuotannon laatumittareiden seurannalla ja niihin tapauskohtaisella reagoinnilla. Tuotantoparametreille tulee määrittää selkeät raja-arvot ja niiden toteutumaa tulee seurata ja reagoida tarpeen vaatiessa. Näistä kriittisimmät olisivat autoklaavausyölkien parametrit ja laminoititilan olosuhteet. Raaka-aineiden valintaan ja niiden laatuun yrityksessä on jo aiemmin kiinnitetty huomiota. Tämä tuleekin huomioida myös jatkossa tuotteiden laadun ylläpitämiseksi sekä kuplan muodostumisen ehkäisemiseksi ja yleisen hävikin välttämiseksi. Myös ennakkohuoltoon ja huoltoseisakkien aikana tehtäviin toimintoihin on panostettu ja näin tulee toimia myös tulevaisuudessa. Ennakkohuolloissa aikaisemmin käyttöön otettujen investointien lisäksi myös uusien investointien huoltotarpeet tulee huomioida tarvittavalla tavalla. Kuviossa 5 on tiivistetty kuplan muodostumisen ehkäisemisen keskeisimmät asiat.



Kuvio 5. Kuplan muodostumisen ehkäisemisen keskeisimmät asiat.

Työn perusteella suurimmaksi kehityskohteeksi nousi leikkuuprosessissa suoritettavan pesuprosessin veden laadun parantaminen. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oyn suorittaman prosessiveden analyysin tuloksista havaittiin, että pesuvesi sisältää mineraaleja, joilla epäillään olevan vaikutusta tuulilasikomponenttien välisen adheesio- ja liimitehtävien lujuteen sekä haitallisten kuplien muodostumiseen. Analyysin tulosten pohjalta tehtiin investointipäätös, mikä sisältää mineraaleja ja muita epäpuhtauksia vähentävän suodatuslaitteiston sekä veden jäähdytyslaitteet ja varastointiasiat. Liitteessä 3 on esitetty suodatuslaitteiston sisältö yksityiskohtaisemmin.

Opinnäytetyöntekijän kokemattomuus tunnistaa todennäköinen kuplan muodostumisen syy tuotti haasteita virheiden analysointiin, sillä vasta dataa kerätessä oppi vähitellen kiinnittämään huomiota eri virhetekijöihin. Tämän vuoksi kuplan muodostumisen analysointi oli tarkempaa työn loppuvaiheessa, mikä saattoi vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. Myös kuplatyypit eivät aina erottuneet selkeästi, jolloin mahdolliset kuplan syntymissyyt eivät olleet pääteltävissä kuplatyyppien perusteella. Kuplatietojen keräämisen haasteena oli quality control (laadun tarkastus) -tarran puuttuminen joistain lasista tai sen antamien tietojen epäselvyys, jolloin jäljitettävyyttä tekijästä, uunista ja taivutuspäivämäärästä uupuivat. Myös työkortista uupui satunnaisesti tieto autoklavointikerrasta sekä käytetystä PVB-kalvosta. Datan keräämisessä ja analysoinnissa saattoi syntyä kirjaus- ja tulkintavirheitä.

Dataa analysoidessa havaittiin kaksi tuotetta (tuote 5 ja 6), joiden valmistukseen tulee jatkossa kiinnittää erityishuomioita. Valmistus- ja materiaalivirheiden, olosuhteiden sekä muiden kuplan muodostumiseen vaikuttavien tekijöiden jäljittäminen oli haastavaa, sillä tietomäärä tuotekohtaisesti jäi hyvin suppeaksi. Jotta saataisiin varmuus mahdollisesta tuotekohtaisesta virheestä ja pystyttäisiin tekemään tarvittavia korjaavia toimenpiteitä, olisi dataa kerättävä vielä enemmän.

Jos pakkaamossa jatketaan tuotekohtaista kuplien muodostumisen seurantaan, on tähän varattava työaika mahdollisimman kattavan datan aikaansaamiseksi. Datan keräämiseen voitaisiin hyödyntää opinnäytetyön aikana luotua Excel-tiedostoa, josta saadaan poimittua halutut tiedot pivot-taulukkoon. Toinen vaihtoehto on luoda uusi tallennusalue, johon pakkaamohenkilökunta pystyisi alkuperäisen tiedoston tietojen lisäksi merkitsemään kuplan sijainnin tuotteessa. Näin saataisiin aiempaa tarkempi tieto kuplan muodostumisen sijainnista tuotekohtaisesti. Työteliäämpi vaihtoehto olisi luoda eräänlainen datapankki, johon pystyisi edellisten tietojen lisäksi liittämään valokuvan.

Kehitysehdotukseksi yritykselle annetaan, että tuotannon eri osastoille luodaan tarkat perehdytysohjeet ja osaamisen varmistuslomakkeet. Perehdytysohjeista tulisi käydä ilmi prosessin näkökulmasta oikeanlaiset sekä turvalliset työskentelytavat ja -välineet. Osaamisen varmistuksella pystyttäisiin seuraamaan perehdytettävän oppimista työvaihe kerrallaan ja näin varmistuttaisiin osaamisesta ennen itsenäistä työskentelyä. Työpisteen perehdyttäjät tulee myös tutustuttaa perehdytysohjeisiin ja osaamisen varmistuslomakkeen käyttöön, jotta kaikki perehdytettävät saavat samanlaisen koulutuksen.

Siisteyden ylläpitoon ehdotetaan 5S-toimintamenetelmän käyttöönottoa, jonka avulla pystyttäisiin ylläpitämään sekä samalla seuraamaan siisteyden ja järjestyksen ylläpitoa tuotanto-osastoilla. Tämä saattaisi vähentää ylimääräisten partikkelien joutumista tuulilasikomposiitin väliin ja siten ehkäisisi kuplien muodostumista. Tämä toimintamenetelmä lisäisi myös tuotantotilojen yleistä siisteyttä ja järjestystä sekä samalla parantaisi turvallisuutta ja viihtyvyyttä.

## LÄHTEET

1. Pilkington, Lasifakta 2012, Perustietoa lasista. Viitattu 1.1.2019. <http://www.pilkington.com/resources/lasifakta2012perustietoalasistastandarditceasiahak2.pdf>
2. Tasolasi yhdistys. Viitattu 2.1.2019. <https://www.tasolasiyhdistys.fi/lasitietoa/>
3. Polymer Properties Database. Viitattu 2.1.2019. <http://polymerdatabase.com/Films/PVB%20Films.html>
4. Car windshields info. Viitattu 2.1.2019. <http://www.carwindshields.info/how-a-windshield-is-made>
5. Autoglass Atlanta. Viitattu 2.1.2019. <https://www.autoglass-atlanta.com/tempered-laminated/>
6. Sekisui S-lec PVB training course 2018, Part 2.
7. Sekisui S-lec B.V. - Technical crosscheck report.
8. Sekisui S-lec PVB training course 2018, Part 1.
9. Finn Lamex Intranet IMS. Viitattu 17.4.2019.
10. Finn Lamex Safety Glass -haastattelu.
11. Grindaix GmbH. Viitattu 11.1.2019. <https://grindaix.de/en/magazine/cnc-grinding-machines/>
12. Investopedia. Viitattu 21.2.2019. <https://www.investopedia.com/terms/o/oem.asp>
13. Ungureanu Viorel, 2014. Advanced design of glass structures. Lecture 3 – Laminated glass and interlayers. Viitattu 13.2.2019. [https://www.ct.upt.ro/suscos/files/2013-2015/1E05/2E5\\_Glass\\_structures\\_L3\\_2014\\_VU.pdf](https://www.ct.upt.ro/suscos/files/2013-2015/1E05/2E5_Glass_structures_L3_2014_VU.pdf)
14. Finn Lamex Safety Glass Oy. Viitattu 13.2.2019. <http://finnlamex.fi/fi/>
15. Finn Lamex Safety Glass Oy. Company overview - Yritysesittely.
16. Keller Uwe, Mortelmans Hans, 1999, Adhesion in Laminated Safety Glass – What makes it work? Viitattu 14.2.2019. <https://www.aisglass.com/sites/default/files/pdfs/technical%20papers/AIS-18.pdf>
17. Kula Daniel, Ternaux Elodie, Hirsinger Quentin, 2013, Materiology: The Creative Industry's Guide to Materials and Technologies, Walter de Gruyter GmbH, ProQuest Ebook Central. Viitattu 14.2.2019. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=1157177>
18. Pilkington. Viitattu 25.2.2019. <https://www.pilkington.com/fi-fi/fi/tietoa-yhtiosta/mita-lasi-on/floatprosessi>
19. Pilkington. Viitattu 25.2.2019. <https://www.pilkington.com/fi-fi/fi/tietoa-yhtiosta/mita-lasi-on/lasin-koostumus>
20. Telleborg. Viitattu 25.2.2019. <https://www.trelleborg.com/en/moulded-components/cases--and--articles/vacuum--rings>

21. Vacuum rings. Viitattu 25.2.2019. <http://www.vacuumrings.com/materials/4553993180>
22. Vacuum rings. Viitattu 25.2.2019. <http://www.vacuumrings.com/#>
23. Kumar Pramendra, Khan Nida, Kumar Deepak, 2016, Polyvinyl butyral (PVB), Versatile template for designing nanocomposite/composite materials: A review. Viitattu 26.2.2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/12b4/1240b4fc12a5be98499b55a8f5657e62d34f.pdf>
24. Lennotech. Viitattu 22.3.2019. <https://www.lennotech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>
25. Comyn John, 1997, Adhesion Science, Royal Society of Chemistry, ProQuest Ebook Central. Viitattu 2.4.2019. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=1185086>
26. Draft Interim REL, 2010, Tripropylene Glycol Methyl Ether. Viitattu 18.4.2019. <https://www.arb.ca.gov/consprod/regact/2010ra/tpm25498491.pdf>
27. Meriluoto Matias, 2009, Tuulilasissa olevan kuplan syntymekanismin selvitys ja kuplan analysointi. Viitattu 18.4.2019. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8561/Meriluoto.Matias.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
28. Merck KGaA, 2019, käyttöturvallisuustiedote - tri(propylene glycol) methyl ether, mixture of isomers.
29. Ebnesajjad Sina, 2011, Handbook of Adhesives and Surface Preparation. Viitattu 19.4.2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978143774461310001X>
30. Helmenstine Anne Marie, 2018, Diffusion Definition in Chemistry. Viitattu 20.4.2019. <https://www.thoughtco.com/definition-of-diffusion-604430>
31. Lean Lion Oy. Viitattu 25.4.2019. <https://www.leanlion.com/miksi-5s>
32. Quality Knowhow Karjalainen Oy. Viitattu 26.4.2019. <http://www.sixsigma.fi/fi/artikkelit/viiden-aessaen-kehitystyoekalu/>
33. Eronen Mika, 2015, Ice Flower - lamination process defects; how to prevent and control them, Glass-Technology International. Viitattu 30.4.2019. [http://var.glassonline.com/uploads/publications/section\\_articles/articlePDF/20161206141420\\_Mikaiceflowers\\_gti215.pdf](http://var.glassonline.com/uploads/publications/section_articles/articlePDF/20161206141420_Mikaiceflowers_gti215.pdf)
34. Valvira, 2018, Talousvesiasetuksen soveltamisohje Osa III Enimmäisarvojen perusteet. Viitattu.15.6.2019. [https://www.valvira.fi/documents/14444/6739502/Talousvesiasetuksen\\_soveltamisohje\\_osa\\_3.pdf/b9faedd0-cd83-fd94-09e2-452e7e7ee123](https://www.valvira.fi/documents/14444/6739502/Talousvesiasetuksen_soveltamisohje_osa_3.pdf/b9faedd0-cd83-fd94-09e2-452e7e7ee123)

## Kuplatyypit, niiden muodostumisen syyt sekä ennaltaehkäiseminen <sup>6</sup>

	Yksittäinen kupla	Ryhmittyneet kuplat	Ryhmittyneet sameat kuplat	Kosteudesta aiheutuneet kuplat	Kontaminaatiosta johtuvat kuplat
<b>Sijainti lasissa</b>	Yksittäinen kupla on useimmiten lasin reunalla	Kuplaryhmät ovat useimmiten lasin reunalla paikallisesti	Kuplaryhmät ovat useimmiten lasin reunalla paikallisesti	Kuplat ovat alkupisteestä levenneenä rykelmänä	Kupla sijaitsee vieraan materiaalin ympärillä tai poikkeaman kohdalla
<b>Muodostumisen syy</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autoklaavin liiallinen kosteus</li> <li>- Autoklaavin liian korkea lämpötila jäähdytysykyssä</li> <li>- Puutteellinen tiivistys</li> </ul>	Puutteellinen tiivistys	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lasiparien epäsopivuus tai epätäsmällinen keskitys</li> <li>- Väärän kokoinen tai huonosti aseteltu kalvo</li> <li>- Liian tiukkaan toisiinsa liitetyt materiaalit</li> <li>- Autoklaavausprosessin liian alhainen paine nostettaessa lämpötilaa</li> </ul>	Lasin ja PVB-kalvon väliin jäävä kosteus. Neste laajenee klaavauksena aikana muodostaen kuplia	Lasin ja PVB-kalvon välissä oleva partikkeli tai lasiparin välinen eroavaisuus, jota kalvo ei pysty kompensoimaan
<b>Ehkäiseminen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autoklaavin kosteus pidetään mahdollisimman alhaisena</li> <li>- Jäähdytysykylin lämpötila pidetään alle 45 °C:ssa</li> <li>- Käytetään kalvon paisumista edistävää tiivistysainetta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nostetaan esilaminoinnin lämpötilaa</li> <li>- Kalvo leikataan pidempää lasia suuremmaksi</li> <li>- Varmistetaan imuletkun tiiveys ja imun ylläpito</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lasiparit taivutetaan ja keskitetään onnistuneesti</li> <li>- Laminointitilan olosuhteet pidetään stabiilina</li> <li>- Kalvo leikataan pidempää lasia suuremmaksi</li> <li>- Komponentit yhdistetään työohjeiden mukaisesti</li> <li>- Ylläpidetään autoklaavausprosessin oikeanlainen toiminta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kalvon säilyttäminen ja kuljettaminen oikein</li> <li>- Laminointitilan olosuhteiden hallinta</li> <li>- Kalvo kuivaaminen tarvittaessa</li> <li>- Ennen laminointia varmistetaan, ettei kalvon ja lasien välissä ole kosteutta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Työskentelyalueet pidetään siisteinä</li> <li>- Lasin puhdistaminen tehdään laadukkaasti</li> <li>- Laminoinnissa käytetään puhdistilavaatetusta</li> <li>- Kontaminaation aiheuttanut tekijä analysoidaan ja jäljitetään uuden kontaminaation välttämiseksi</li> </ul>



# Prosessiveden analyysin testausseleoste



Lounais-Suomen  
vesi- ja ympäristötutkimus Oy

TESTAUSSELOSTE  
Akkreditoitu laboratorio \*  
21.2.2019

19-1168 1 (2)  
#1

Finnlamex Safety Glass Oy  
Vierumäentie 28  
23800 LAITILA



Tilausno 224196 (X/S), saapunut 8.2.2019, näytteet otettu 7.2.2019 (9:00)  
Näytteenottaja: Laato Kalle

## NÄYTTEET

Lab.nro	Näytteen kuvaus
1517	Pesukone, allas
1518	Pesukone, tulovesi

## MÄÄRITYSTULOKSET / NÄYTTEET

Määrittäminen	Yksikkö	1517	1518
Sameus *	FNU	37	0,1
pH (25 °C)		8,7	8,3
Sähkönjohtavuus (25 °C) *	µS/cm	140	150
Kloridi, Cl *	mg/l	3,9	3,5
Kalium, K *	mg/l	1,4	1,3
Kalsium, Ca *	mg/l	26	26
Magnesium, Mg *	mg/l	1,5	1,4
Natrium, Na *	mg/l	2,5	2,0
Rauta, Fe *	mg/l	0,027	0,008
Kokonaiskovuus *	mmol/l	0,71	0,70
kokonaiskovuus *	°dH	4,0	3,9
Kalsiumkovuus *	mmol/l	0,85	0,84
Magnesiumkovuus *	mmol/l	0,06	0,06

Merkitöjen selityksiä: P = määrittäminen kesken, E = ei tehty, ~ = noin, < = pienempi kuin, < = pienempi tai yhtäsuuri kuin, > = suurempi kuin, > = suurempi tai yhtäsuuri kuin.  
\* -merkityt analyysit ovat akkreditoituja.

Teemu Paloheimo  
laboratoriopäällikkö

Tutkimustulokset pätevä vain tutkittuun näytteeseen. Asiakirjan osittainen kopioiminen on kielletty.  
Analyysimenetelmien viitteet ja mittausepävarmuustiedot ovat liitteellä. Akkreditointi ei koske näytteenottoa eikä lausuntoa.

Katuosoite Telekatu 16 20360 TURKU	Postiosoite Telekatu 16 20360 TURKU	Puhelin *(02) 274 0200	Sähköposti teemu.paloheimo@lsvs.fi	Alv.rek. Y 1564941-9 Kmro 774822
--	---	---------------------------	---------------------------------------	--


**MENETELMÄTIEDOT**

Määrittys	Menetelmän nimi ja tutkimuslaitos (suluissa)
Sameus *	SFS-EN ISO 7027 (TL27)
pH (25 °C)	SFS 3021 (TL27)
Sähkönjohtavuus (25 °C) *	SFS-EN 27888 (TL27)
Kloridi, Cl *	SFS-EN ISO 10304-1 (TL27)
Kalium, K *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Kalsium, Ca *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Magnesium, Mg *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Natrium, Na *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Rauta, Fe *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Kokonaiskovuus *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Kalsiumkovuus *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)
Magnesiumkovuus *	SFS-EN ISO 11885 (TL27)

**TUTKIMUSLAITOSTIEDOT**

Tunnus	Tutkimuslaitoksen nimi
TL27	Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy (FINAS T101)

**MITTAUSEPÄVARMUUSTIEDOT**

Määrittys	Näyte	Tuloksen epävarmuus	Määrittyspvm.
Sameus *	2019/1517	±20 %	8.2.2019
	2019/1518	±0,1 FNU	8.2.2019
pH (25 °C)	2019/1517	±0,2 yks.	8.2.2019
	2019/1518	±0,2 yks.	8.2.2019
Sähkönjohtavuus (25 °C) *	2019/1517	±3 %	8.2.2019
	2019/1518	±3 %	8.2.2019
Kloridi, Cl *	2019/1517	±10 %	13.2.2019
	2019/1518	±10 %	13.2.2019
Kalium, K *	2019/1517	±15 %	13.2.2019
	2019/1518	±15 %	13.2.2019
Kalsium, Ca *	2019/1517	±15 %	13.2.2019
	2019/1518	±15 %	13.2.2019
Magnesium, Mg *	2019/1517	±10 %	13.2.2019
	2019/1518	±10 %	13.2.2019
Natrium, Na *	2019/1517	±15 %	13.2.2019
	2019/1518	±15 %	13.2.2019
Rauta, Fe *	2019/1517	±15 %	13.2.2019
	2019/1518	±2 µg/l	13.2.2019
Kokonaiskovuus *	2019/1517	±10 %	13.2.2019
	2019/1518	±10 %	14.2.2019
Kalsiumkovuus *	2019/1517	±10 %	13.2.2019
	2019/1518	±10 %	13.2.2019
Magnesiumkovuus *	2019/1517	±0,02 mmol/l	13.2.2019
	2019/1518	±0,02 mmol/l	13.2.2019

Tutkimustodistus pätee vain tutkitulle näytteelle. Asiakijan osittainen kopiointi on kielletty.  
 Analyysimenetelmien viitteet ja mittausepävarmuustiedot ovat liitteissä. Akkreditointi ei koske näytteenottoa eikä lausuntoa.

# Veden puhdistuslaitteiston investointiraportti

Vedenpuhdistuslaitteiston investointi raportti

Kalle Laato

## Tasolasin leikkuuprosessissa suoritettavan pesuprosessin käyttöveden laadun parantaminen

### Investoinnin syy

Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oyn suorittaman prosessiveden analyysin tuloksista havaittiin, että hiottujen lasien pesuvetenä käytettävä autoklaavin jäähdytyksessä hyödynnetty lauhdevesi sisältää mineraaleja, joilla epäillään olevan vaikutusta tuulilasi komponenttien välisen adheesion lujuuteen sekä haitallisten kuplien muodostumiseen. Analyysin tuloksista veden sähkönjohtavuus ylitti PVB-kalvo valmistaja Sekisui S-Iec B.V., sekä lasi printtausalan yritys Dip-Tech Digital Printing Technologies Ltd. suositusarvot.

### Investoinnin tavoite

Investoinnin tavoitteena on parantaa tuotannossa käytettävän veden laatua niin, että tavoitetaan yhteistyökumppaneiden antamat suositusarvot sekä vähentämään pesukoneiden ja niiden ympäristön pesu- ja huoltotarvetta. Tämä lisäksi pystytään parantamaan myös CNC-hiomakoneen hiomalaatua.

### Toteutuman seuranta

Veden suodatuskokonaisuuden käyttöönoton jälkeen prosessivedestä otetaan näyte, joka analysoidaan osto palveluna. Tuotannon ja laitteiston ollessa käynnissä määrätyn ajan vedestä otetaan uusi näyte analysoitavaksi, jotta saadaan tietoa laitteiston suodatustehokkuudesta. Suodatuskokonaisuuden toiminnan aikana tuotannossa seurataan vähentykö kuplien muodostuminen laseihin. Suodatuskokonaisuuden laitteille luodaan omat ennakkohuoltosuunnitelmat.

### Vedensuodatus kokonaisuuden sisältö

**BENTELER-PESUKONEEN SYÖTTÖ- JA KIERTOVEDENLAADUN PARANTAMISEN KOKONAISUUS:**

- **Varaaja/lämmönvaihdin**  
Varaaja tai lämmönvaihdin varastoi autoklaavilta tulevan veden ja jäähdyttää sen käänteisosmoosilaitteistolle sopivaan lämpötilaan (alle 35 °C).
- **Esisuodatin - suodatinkotelo ja suodatinpatruuna 20 mikronia**  
Autoklaavilta tulevasta vedestä erotetaan suodatinpatruunoilla kiinteät partikkelit. Suodatinpatruunat poistavat myös sameutta ja värjäymiä. Vieraiden partikkelien poisto helpottaa pumppujen ja venttiilien sekä muun puhdistuslaitteiston toimintaa sekä vähentää huoltotarvetta.

- **Vedenpehmenin - BWT Bestsoft 11**  
Vedenpehmenin poistaa vedestä kalsiumia (Ca) ja magnesiumia (Mg), jotka yhdessä muodostavat veden kokonaiskovuuden. Pehmenin ehkäisee kalkkikiven ja kalkkisaostumien muodostumista laitteisiin ja putkistoon. Vedenpehmenin liitetään autoklaavilta tulevan veden esisuodattimen ja käänteisosmoosilaitteen väliin. Pehmenin helpottaa laitteiston puoliläpäisevän membraani kalvon toimintaa ja samalla vähentää sen huoltotarvetta.
- **Käänteisosmoosilaitte - Automaattinen käänteisosmoosilaitte BWT bestaqua 61 LT**  
Käänteisosmoosilaitteessa vesi pakotetaan paineen avulla kulkemaan pelkästään vesimolekyylejä läpäisevän kalvon läpi. Vesi siirtyy kalvon lävitse suolaisemmasta liuoksesta laimeampaan. Vieraat aineet kuten suolat, orgaaniset epäpuhtaudet sekä muut hiukkaset eivät pysty läpäisemään kalvoa. Käänteisosmoosin tuloksena prosessoitu vesi jakautuu permeaattiin (pesukoneelle menevä puhdas vesi) ja rejektiin (viemäriin laskettava suodos).
- **Kalvopaineastia 328 L, (2 kpl)**  
Käänteisosmoosilaitteen tuottama puhdas vesi varastoidaan kalvopaineastiaan, mistä se johdetaan käyttöön eli pesukoneelle. Paineastialla varmistetaan veden riittävä määrä pesuprosessia varten. Paisunta-astian sisällä oleva kalvo, kompensoi järjestelmässä olevan veden lämpölaajenemisvaikutuksia ylläpitämällä oikean käyttöpaineen sekä samalla ehkäisemällä mahdolliset paineiskut.

#### BOTTERO CNC-HIOMAKONEEN VEDENSYÖTÖN LAADUN PARANTAMINEN:

- **Esisuodatin - suodatinkotelo ja suodatinpatruuna 20 mikronia**
- **Veden pehmenin J-CAB 35-10**  
Kunnanveden tuloputkeen liitettävän pehmentimen kautta vesi johdetaan esipesukoneelle sekä CNC-hiomakoneelle. Hiomakoneella ennalta pehmenetty vesi korvaa mahdollisesti käytettävän hiomajähdytysaineen käytön.

#### Huomioitavaa

Laitteistot, joihin johdetaan valmistettua ionivettä, on niiden messinkiosat korvattava muilla materiaaleilla syöpymisen estämiseksi.

8.4.2019