

Opintojakson nimi	Kiertotalouslabra, autohanke
Koulutus	Harjoittelu
Ryhmä	PVB-kalvo benchmark
Palautuspäivämäärä	26.8.2025

Jaakko Paukku

PVB-kalvon irrottamismenetelmät ja käyttökohteet

– vaatimuksena riittävä puhtaus

Sisältö

1 Johdanto	5
2 Irrotusmenetelmät	10
2.1 Irrotusmenetelmät – Intia	11
2.2 Irrotusmenetelmät – Kiina	13
2.3 Irrotusmenetelmät – Sveitsi	20
2.4 Irrotusmenetelmät – Iso-Britannia	25
2.5 Irrotusmenetelmät – Etelä-Korea	26
2.6 Irrotusmenetelmät – Slovakia	36
2.6.1 Ensimmäiset testit	37
2.6.2 Toiset testit	41
3 Slovakialainen linjasto	47
3.1 Minimi-linjasto – täysin mekaaninen erottelu: A, B, C	48
3.2 Pitkä linjasto – myös kemiallinen erottelu: D, A, A, B, B, C, E	48
4 Puhtaus ja käyttökohteet	50
4.1 Puhtaus ja käyttökohteet lasille	50
4.2 Puhtaus ja käyttökohteet PVB-kalvolle	51
5 Benchmark PVB-kalvon irrottamismenetelmistä	54
Lähteet	58

Kuvat

Kuva 1. Laxmi Polymers -yrityksen kierrätettyä lasia (Laxmi Polymers 2019a).	12
Kuva 2. Laxmi Polymers -yrityksen käsittelemää PVB:tä (Laxmi Polymers 2019b; Insider Cars 2023).	13
Kuva 3. Piirustus hintavasta PVB:n kierrätyslinjastosta (Nanjing Beyou Extrusion Machinery Co., Ltd. 2025b).	14

Kuva 4. Hintava PVB:n kierrätyslaite (Suzhou Jwell Machinery Co., Ltd. 2025b).	15
Kuva 5. Kiinalainen tuulilasin kierrätyslinjasto kuvakulma 1 (Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025g).	17
Kuva 6. Kiinalainen tuulilasin kierrätyslinjasto kuvakulma 2 (Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025h).	18
Kuva 7. Kiinalaista tuulilasin kierrätyslaitteistoa 1 (Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025b).	19
Kuva 8. Kiinalaista tuulilasin kierrätyslaitteistoa 2 (Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025c).	20
Kuva 9. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää lasia (Ecological Recycling Complex 2023f).	22
Kuva 10. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää PVB:tä (Ecological Recycling Complex 2023g).	23
Kuva 11. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää PVB:tä granulaattina (Ecological Recycling Complex 2023h).	24
Kuva 12. Ecological Recycling Complex -yrityksen tuulilasinkierrätyskone (Ecological Recycling Complex 2023j).	25
Kuva 13. Eteläkorealainen PVB-kalvon ja lasin erottelumenetelmä (Swain ym. 2015, 616).	28
Kuva 14. Eteläkorealaisen menetelmän tehokkuus (Swain ym. 2015, 621).	29
Kuva 15. Eteläkorealainen prosessi (Swain ym. 2015, 622).	30
Kuva 16. Eteläkorealaisen linjaston laitteet (Swain ym. 2022, 4).	33
Kuva 17. Eteläkorealainen linjasto (Swain ym. 2022, 5).	33
Kuva 18. Eteläkorealainen ELV-tuulilasin pienennysprosessi (Swain ym. 2022, 6).	34
Kuva 19. Eteläkorealaista erottelua (Swain ym. 2022, 7).	35
Kuva 20. Eteläkorealaisen prosessin materiaalien massoja (Swain ym. 2022, 9).	36
Kuva 21. Slovakialainen V-puristin (Šooš ym. 2021, 5).	38
Kuva 22. Slovakialainen S-puristin (Šooš ym. 2021, 5).	38
Kuva 23. Slovakialainen värinälaite (Šooš ym. 2021, 6).	41

Kuva 24. Slovakialaisten menetelmien tuottamaa lasimursketta (Šooš ym. 2021, 8).	44
Kuva 25. Neljä moduulia (Šooš ym. 2020a; Šooš ym. 2020b, 9–12; Šooš ym. 2021, 10).	47
Kuva 26. Slovakialaisittain käsiteltyä PVB-kalvoa (Šooš ym. 2021, 9).	52

Taulukot

Taulukko 1. PVB-kalvon irrottamismenetelmien benchmark luku 1	6
Taulukko 2. Tuotantokapasiteetit tuulilasin käsittelylle	55
Taulukko 3. PVB-kalvon irrottamismenetelmien benchmark luku 5	57

1 Johdanto

Tässä raportissa tarkastellaan ajoneuvon tuulilasin PVB-kalvon irrottamismenetelmiä, käyttökohteita ja puhtausvaatimuksia. Myös lasiin liittyviä asioita käsitellään, sillä se liittyy olennaisesti PVB-kalvon irrottamiseen. PVB-kalvon ja lasin erottelussa toisistaan on järkevää huomioida myös lasin hyödyntäminen. Lisäksi tarkastellaan taloudellisia näkökohtia.

PVB-kalvon irrotusmenetelmät on nimetty niiden kehittäneiden tahojen edustamien maiden mukaan helpomman hahmottamisen vuoksi. Osaa irrottamismenetelmistä käytetään tiedetysti liiketoiminnassa. Näitä ovat intialaisten, kiinalaisten ja sveitsiläisten menetelmät. Osa taas on kehitetty osana tieteellisiä tutkimuksia. Näiden menetelmien pitäisi tutkijoiden mukaan olla taloudellisesti kannattavia, mutta tässä raportissa ei selvitetty, ovatko ne kaupallisessa käytössä tai onko tätä kokeiltu. Näihin lukeutuvat englantilaisten, eteläkorealaisten ja slovakialaisten menetelmät.

Tosin slovakialaiset tutkijat Šooš ym. (2021, 4) kehittivät tuulilasin käsittelyyn tarvittavat laitteet/menetelmät MAVEBA s.r.o -yrityksen kanssa. Tämä yritys siis oletettavasti käyttää menetelmiä kaupallisesti. MAVEBA s.r.o (2025a–2025b) on ilmeisesti autopurkaamo.

Slovakialaisten tutkijoiden Šooš ym. (2021) irrotusmenetelmiä tarkastellaan muita tarkemmin, sillä ne on kuvattu melko tarkasti. Lisäksi he ovat keskittyneet taloudellisuuteen ja teknologiseen saavutettavuuteen pienten ja keskisuurten yritysten näkökulmasta, mikä on Suomen mittapuulla oleellista.

Kuitenkin myös muiden tahojen esiteltävät PVB:n ja lasin erottelumenetelmät voivat olla kokonaan tai osittain taloudellisesti saavutettavissa tai herättää ideoita. Esimerkiksi eteläkorealaisten Swain ym. (2022) prosessi voi olla taloudellisesti kannattavampi, sillä se sisältää vain mekaanisia menetelmiä. Lopuksi eri menetelmiä benchmark-vertaillaan tiivistetysti. Aikarajoitteiden vuoksi raportti kattaa vain pienen osan PVB:n ja lasin erottelusta tehdyistä tutkimuksista sekä tutkimuksissa ja yritystoiminnassa kehitetyistä menetelmistä.

Seuraavassa taulukossa on likimääräinen benchmark-vertailu eri maiden menetelmien välillä. Taulukko on myös luvussa 5, jossa sen sisältöä avataan tarkemmin.

Taulukko 1. PVB-kalvon irrottamismenetelmien benchmark luku 1

	Intia	Kiina	Sveitsi	Iso-Britannia	Etelä-Korea	Slovakia
Hinta	Korkea	Korkea	Matala/ Keskisuuri?	Keskisuuri?	Matala	Matala
Kapasiteetti	Korkea	Korkea	Korkea	Matala	Matala	Matala
Puhtaus	Matala/ Keskikorkea	Matala/ Keskikorkea	Keskisuuri/ Korkea?	Korkea	Korkea	Korkea
Teknologia	Matala	Matala	Keskisuuri/ Korkea?	Keskisuuri/ Korkea	Matala	Matala

Taulukon kysymysmerkit heijastavat sitä, että arvioinnin tekeminen on ollut haastavaa rajallisilla tiedoilla. Esimerkiksi menetelmien hinnoista tai PVB:n puhtausasteesta on ollut haastavaa löytää tietoa.

PVB eli polyvinylibutyaali kuuluu polymeereihin. Se on myös hartsi ja kestopuovi. PVB-kalvoa käytetään pääasiassa turvalaseissa kahden lasilevyn välikappaleena laminaattina kulkuneuvoissa ja rakennuksissa. Lasien rikkoutuessa PVB-kalvo pitää särkyneet lasinpalat yhdessä. (Dhaliwal & Hay 2002, 245; Ahmad ym. 2013, 109; Swain ym. 2015, 615; Zhang ym. 2015, 404; Šooš ym. 2021, 1–2.)

Šooš ym. (2021, 2) mukaan yleisimmät kalvomateriaalit laminoidussa lasissa ovat PVB, EVA ja ionoplast SentryGlassPlus (SGP), joista yleisin on PVB. Glassware Guru (2021) taas väittää, että turvalasissa käytettävä muovi on yleensä joko PVB:tä, etyleenivinyylasetaattia (EVA) tai termoplastista

polyuretaania (TPU). Laminoidussa lasissa käytetään hehkutettua lasia, joka saatetaan myös karkaista (Glassware Guru 2021; Campbell 2023). Skyview Auto Glass (2025) kertoo, että tuulilaseissa käytettävä lasi on tasolasia, mutta jotkin valmistajat ovat alkaneet kokeilla karkaistun tai extra-paksun lasin käyttöä tuulilaseissa. Laminoitu lasi valmistetaan yleensä korkeassa paineessa ja lämpötilassa painekattilassa (Šooš ym. 2021, 2).

PVB-kalvo on kallista, mutta sitä päätyy silti ajoneuvoista paljon kaatopaikoille (Dhaliwal & Hay 2002, 245; Swain ym. 2015, 615). Dhaliwal & Hay (2002, 246–247, 253, 255) mukaan tämä johtuu siitä, että sen kierrätyksen uskotaan olevan haasteellista, koska ajatellaan, että PVB:n ominaisuuksien pitäisi olla yhdenmukaiset. Kuitenkin, vaikka eri valmistajat käyttävät eri pehmittimiä, ja PVB:n koostumus voi täten vaihdella, voidaan eri kierrätettyjen PVB-laatuojen (tyyppien) sekoituksesta silti valmistaa uutta laminaattia laseihin käytettäväksi menettämättä optista kirkkautta. Tutkimuksessa myös onnistuneesti testattiin tämä käytännössä.

PVB-kalvon ja lasin irrottaminen toisistaan on mahdollista erilaisin menetelmin (Dhaliwal & Hay 2002; Swain ym. 2015; Šooš ym. 2021). Lisäksi se voi olla mahdollista tehdä taloudellisesti kannattavasti, samalla kun PVB saadaan täysin tai lähes täysin puhtaaksi lasista (Swain ym. 2015, 621–622; Šooš ym. 2021, 4, 11).

Kiinalaisilla Alibaba.com- ja Made-in-China.com-sivustoilla 0,76 mm paksun tuulilaseihin soveltuvan PVB-kalvon tukkuhinta on edullisimmillaan n. 2–5 e/m² riippuen tilausmäärästä. Näiden minimitalausmäärä on välillä 1–1 000 m². Erimuotoisten henkilöauton tuulilasien tukkuhinnat ovat edullisimmillaan n. 20 e/kpl. Tosin yksittäisten automallien tuulilaseja on myynnissä hintaan 1 €/kpl. Tuulilasien minimitalausmäärä vaihtelee 10 ja 2 000 kpl välillä. (Alibaba 2025; Guangzhou Lingyue Auto Parts Co., Ltd. 2025a–2025b; Made-in-China 2025; Qingdao Haocheng Industrial Co., Ltd. 2025.)

Brittiläisellä Glasswarehouse.co.uk-sivustolla 6,4 mm laminaattilasi maksaa n. 56 e/m² ilman veroja ja 67 e/m² verojen kanssa (Simply Glazing Ltd 2025).

Intialaisella Birkanengg.co.in-sivusto-sivustolla paksuhko 11,52 mm PVB-laminaattilasi maksaa n. 27 e/m² (Birkan Engineering 2025). Brittiläisellä Fhbrundle.co.uk-sivusto 11,52 mm PVB-laminaattilasi maksaa yli 150 e/m². Tämä painaa 28,75 kg. (F.H.Brundle 2025.) Ruotsalaisella Gcp.se-sivusto-sivustolla Volvon tuulilasit maksavat n. 250 e tai enemmän per kappale (ECRIS AB / GCP 2025).

Pitää huomioida, että edellisiin hintoihin pitää lisätä vielä vaihteleva määrä rahtimaksuja, veroja ja vastaavia, joten ne eivät ole kovin vertailukelpoisia. Lisäksi laadussa on luultavasti eroja. Hinnat antavat kuitenkin jotain käsitystä PVB-kalvon, PVB-laminaattilasin ja tuulilasien hinnoista. Tämä voi auttaa PVB-kalvon ja lasin erottelun kokonaiskustannusten ja potentiaalisten tuottojen arvioinnissa.

Teollisuusliitto ry:n (2019) Tekijalehti.fi-sivustolla kerrotaan, että Pilkington Automotive Laitilan tehtaassa tuulilasin raakalasin paksuudeksi tulee 2,1–4,0 mm, PVB-kalvon 0,76 mm ja valmiiden tuulilasien 4,96–8,76 mm. Mallick (2012, 25) kertoo, että tuulilasien lasikerrosten paksuus on 1,8–2,3 mm per lasilevy. Näiden välissä olevan PVB-kalvon paksuus on tyypillisesti 0,76 mm. Vertailun vuoksi autoissa käytetyn karkaistun lasin paksuus on 2,4–2,6 mm. Henkilöauton tuulilasin pinta-ala on tyypillisesti n. 59 x 31,5 tuumaa (AIS Windshield Experts 2020). Tämä on n. 150 x 80 cm, joka vastaa 1,2 m² pinta-alaa. Toki tuulilasien koossa on vaihtelua riippuen auton koosta ja mallista.

PVB:n tiheys on n. 1,1 g/cm³ (TRiISO LLC 2015; National institute of standards and technology 2025; Scientific Polymer Products Inc. 2025; Sekisui chemical Co., Ltd. 2025; Sigma-Aldrich 2025). Yhden tuulilasin PVB-kalvon massaksi voidaan siis laskea $0,76 \text{ mm} * 1\,200\,000 \text{ mm}^2 * 0,0011 \text{ g/mm}^3 = 1\,003,2 \text{ g} = \text{n. } 1 \text{ kg}$. Myös Tupý ym. (2012, 133) olettavat yhden ELV-ajoneuvon tuulilasin sisältävän n. 1 kg PVB-kalvoa.

Tuulilasin lisäksi vuodesta 2018 lähtien on joka kolmannessa ajoneuvossa ollut laminoidut sivulasit (Atiyeh 2019; AAA – The Auto Club Group 2024). Seuraavan linkin takaa löytyy lista ajoneuvomalleista ja niiden ikkunoista, joissa

on käytetty laminaattia tuulilasin lisäksi:

<https://www.aaa.com/AAA/common/AAR/files/Laminated-Glass-Vehicle-List.pdf>

(AAA – The Auto Club Group 2019).

Pelkästään Euroopassa poistuu käytöstä miljoonia ajoneuvoja vuodessa (Swain ym. 2015, 615; Euroopan komissio 2024). Suomessa romutetaan n. 80 000 autoa vuodessa (Autoalan Tiedotuskeskus 2025; Suomen Autokierrätys Oy 2025). Täten nyt kaatopaikoille päätyvää PVB-kalvoa voitaisiin Suomessa potentiaalisesti hyötykäyttää vuosittain kymmeniä tonneja.

2 Irrotusmenetelmät

Laminoidun lasin toimivat erottelumenetelmät voidaan jakaa neljään tyyppiin: mekaaninen, termodynaaminen, kemikaalinen sekä yhdistetyt menetelmät. Näistä yleisin on mekaaninen, mutta myös yhdistetyt menetelmät on yleinen. Valitut menetelmät valitaan vaaditun lopputuotteen ja laadun mukaan. Käytettävien teknologioiden perusteella menetelmät voidaan jakaa kuitenkin kahteen kategoriaan: kuiviin menetelmiin eli mekaaniseen ja termodynaamiseen erotteluun sekä märkiin menetelmiin eli kemialliseen erotteluun. (Šooš ym. 2021, 3.)

Swain ym. (2015, 617–618) mukaan täydelliseen PVB-kalvon ja lasin erotteluun ei riitä pelkkä mekaaninen tai kemiallinen erottelu. Näiden yhdistelmä sen sijaan toimii. Toisaalta Swain ym. (2022) onnistuivat uudemmassa tutkimuksessaan saavuttamaan tehokkaan erottelun pelkillä mekaanisilla menetelmillä. Prosessin viimeisessä vaiheessa käytettiin hydrodynaamista puhdistusta, johon sisältyi mm. painepesu. Tämäkin lasketaan siis mekaaniseksi menetelmäksi, sillä pelkän veden käyttöä ei lasketa kemialliseksi menetelmäksi.

Šooš ym. (2021, 2–3, 9–11) mukaan tehokas erottelu sekä laminaatin osien puhtaus vaatii, että käytetään useita menetelmiä, joihin sisältyy myös "märkä" eli kemiallinen menetelmä. Menetelmiin sisältyy mekaaninen vaihe, jossa rikotaan tai erotetaan lasi kalvosta. Tällöin kalvo joko hajotetaan tai ei. Tämän jälkeen suoritetaan kemiallinen erottelu lämmön vaikutuksen alla (liottaen tiesuolaliuoksessa 5 min 60 °C:ssa). Lopuksi käytetään mekaanista menetelmää, kuten hydrodynaamista puhdistusta, pesua, ja kuivausta. Kaikki menetelmät vaikuttavat kierrätetyn PVB-kalvon ominaisuuksiin. Tämä on huomioitava prosessoinnin aikana ja myös kierrätettävyyden kannalta. Kierrätetty PVB-kalvo voidaan valmistaa uudeksi laminoidun lasin PVB-kalvoksi käyttämällä ekstruusiota eli suulakepuristusta.

2.1 Irrotusmenetelmät – Intia

Insider Cars (2023; 2025), joka on osa Business Insider:ia, esittelee YouTube-videolla intialaisen Laxmi Polymers -yrityksen menetelmiä (<https://www.youtube.com/watch?v=Nrgxu7eeAd0>). Aluksi rikkiäiset tuulilasit syötetään lasinmurskaimeen, joka mankeloi lasit pieniksi siruiksi. Sitten PVB-kalvot kerätään käsin ja syötetään pyörivään reiälliseen sylinterinmuotoiseen laitteeseen, joka erottaa lisää lasia PVB-kalvosta. Tässä vaiheessa, kun PVB-kalvoon on jäänyt lasia enää alle 1 %, PVB heitetään Banbury-sekoittimeen, joka on kuin "vaivauskone". Tässä vaiheessa PVB:stä aletaan valmistaa erilaisia tuotteita. Tämä vaatii tuotteesta riippuen erilaisten kemiallisten yhdisteiden, polymeerien ja kumien lisäämistä. Lisäksi käytetään lämpöä ja painetta, jotta aineet saadaan "vaivattua" yhteen. Saatu massa viedään ekstruuderiin, joka käyttää seulonta- ja suodatustyökaluja, joilla poistetaan jäljelle jäävät epäpuhtaudet. Toista ekstruuderiä käytetään muodostamaan PVB-sekoitus granulaateiksi tai pelleteiksi, joihin sekoitetaan reagensseja, jotka kuivaavat sekä poistavat hometta ja hajut.

Videolla kerrotaan, että Laxmi Polymers kierrättää 100–150 tonnia PVB:tä kuukaudessa (Insider Cars 2023). Laxmi Polymers (2021a) kertoo omilla sivuillaan, että he tarjoavat kahdenlaisia laitteistoja. Pienemmän kapasiteetin laitteistot käsittelevät 200–300 tonnia PVB:tä kuukaudessa, suuremman kapasiteetin 5–20 tonnia tunnissa. Jälkimmäiset laitteistot ovat seurausta kumppanuudesta Alfa Therm Ltd. -yrityksen kanssa ja CE-sertifioituja. Laitteistoilla saavutettava lasimurskeen koko on 2–20 mm tai 2–30 mm ja PVB-kalvon puhtaus alle 1 % lasia (Laxmi Polymers 2021a–2021b). Laxmi Polymers (2021a) kertoo myyvänsä Intiassa lasimursketta hintaan \$60–90/tonni (n. 50–80 e/tonni) ja PVB-yhdisteitä \$400–800/tonni (n. 350–700 e/tonni). He kertovat myös, että laitteita on helppo liikuttaa paikasta toiseen.

Seuraavassa kuvassa näkyy Laxmi Polymersin (2019a) kierrättämää lasia, siinä olevia epäpuhtauksia ja sen varastointiolosuhteita. Mustat palat ovat myös lasia.



Kuva 1. Laxmi Polymers -yrityksen kierrätettyä lasia (Laxmi Polymers 2019a).

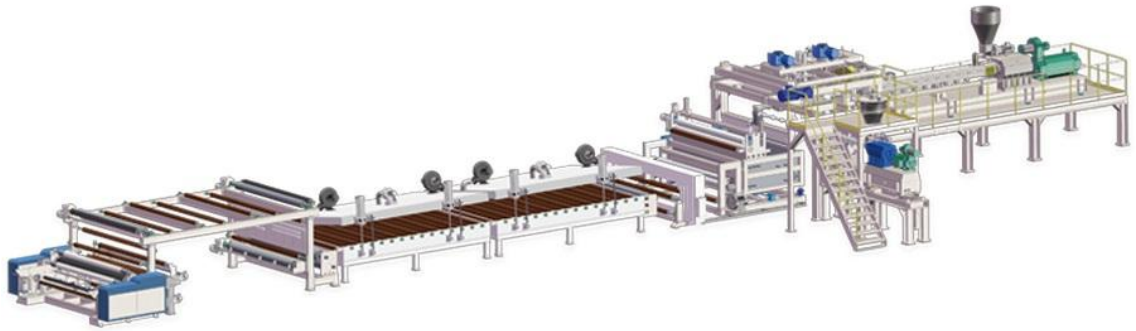
Seuraavassa kuvassa näkyy Laxmi Polymers:in (2019b) käsittelemää PVB:tä, joka näkyy myös Insider Cars:in (2023) YouTube-videolla. Kuvan PVB:tä ei ole vielä viety sekoittimeen jalostettavaksi.



Kuva 2. Laxmi Polymers -yrityksen käsittelemää PVB:tä (Laxmi Polymers 2019b; Insider Cars 2023).

2.2 Irrotusmenetelmät – Kiina

Yksi PVB:n kierrätyslinjasto, ja jopa yksittäinen PVB:n kierrätyslaite, voi maksaa satojatuhansia euroja. Linjastolla käsittelykapasiteetti on tyypistä riippuen 200–300 kg/h...800–1400 kg/h. Laitteilla kapasiteetti on mallista riippuen 400, 600 tai 1200 kg/h. (Nanjing Beyou Extrusion Machinery Co., Ltd. 2025a; Suzhou Jwell Machinery Co., Ltd. 2025a.) Seuraavassa on näistä piirustus ja kuva.



Kuva 3. Piirustus hintavasta PVB:n kierrätyslinjastosta (Nanjing Beyou Extrusion Machinery Co., Ltd. 2025b).



Kuva 4. Hintava PVB:n kierrätyslaite (Suzhou Jwell Machinery Co., Ltd. 2025b).

Kiinalaisen SUNY Group -yrityksen tytäryhtiöt Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. ja Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. myyvät erilaisia laminaatin kierrätyskoneita, jotka maksavat n. 3 000–40 000 e. PVB:n puhdistukseen ja PVB-pellettien tekemiseen tarvittavien koneiden hinta ei vaikuta olevan julkisesti saatavilla. Yritysten koneilla laminaatista saadaan poistettua 99 % lasista. (SUNY Group 2023–2024; Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025a–2025h; Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025a.)

SUNY Group (2023) kertoo YouTube-videollaan, että PVB-kalvon kierrätyksessä pitää ensin hajottaa yhdellä koneella pintalasi, jotta tuulilasi pehmenee (<https://www.youtube.com/watch?v=bRtCgTBYRU4>). Tämän jälkeen tuulilasia liotetaan vedessä 2–3 päivää, jolloin lasi irtaana enemmän PVB-kalvosta, joka jää suhteellisen kokonaiseksi. Tämän jälkeen toisella koneella erotetaan lasi ja PVB toisistaan. SUNY Group (2025) kertoo, että heidän uudella järjestelmällään voi käsitellä laminoitua lasia 8–10 tonnia/h.

Seuraavassa on linkkejä videoihin kiinalaisista menetelmistä:

- <https://www.youtube.com/watch?v=gZHSimuEdrQ> (Gomine E Waste Recycling Machine 2024)
- <https://www.youtube.com/watch?v=LB07lj4gJ7Y> (Gomine E Waste Recycling Machine 2025)
- <https://www.youtube.com/watch?v=VixvgM7yCRM> (Henan Recycle Env Protection Equipment Co., Ltd 2024)
- <https://www.youtube.com/watch?v=Scrdx5zNnF4> (SUNY Group 2025).

Seuraavissa kuvissa on Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. -yrityksen (2025g–2025h) linjasto PVB-kalvon ja lasin erotteluun. Näiden jälkeen on kuvissa Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. -yrityksen (2025b–2025c) laitteita.



Kuva 5. Kiinalainen tuulilasin kierrätyslinjasto kuvakulma 1 (Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025g).



Kuva 6. Kiinalainen tuulilasin kierrätyslinjasto kuvakulma 2 (Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025h).



Kuva 7. Kiinalaista tuulilasin kierrätyslaitteistoa 1 (Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025b).



Kuva 8. Kiinalaista tuulilasin kierrätyslaitteistoa 2 (Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025c).

2.3 Irrotusmenetelmät – Sveitsi

Sveitsiläinen Ecological Recycling Complex (2023a–2023e) kertoo, että he kierrättävät tuulilaseja Sveitsissä ja EU-maissa. Heidän koneensa erottelee PVB-kalvon ja lasin täysin ympäristöystävällisesti ja täysin turvallisesti. Heidän mobiili yksikkönsä pystyy käsittelemään 50 tonnia per vuoro. Vuoron pituutta ei ole määritelty, mutta se viitanee työvuoroon. Laitetta pystyy käyttämään missä vain riippumatta paikallisista olosuhteista. Prosessoinnin tuloksena syntyy

puhtaita, pestyjä lasinsiruja ja täysin lasista puhdistettua PVB-kalvoa, joka säilyttää 100 % alkuperäisestä koostaan. He ilmeisesti myyvät laitetta. Lisäksi he myyvät kierrätettyä lasia sekä PVB:tä kiinteässä muodossa ja granulaatteina kaikkiin EU-maihin. ERC-koneella on korkea tuottavuus, se on kustannustehokas ja sitä on helppo huoltaa. Laite on metallia ja se painaa n. 1 000 kg.

Ecological Recycling Complex (2023b–2023i) kertoo haluavansa vähentää jätteen määrää. Heidän pitkän aikavälin tavoitteenaan on tuottaa yli 1 000 kierrätyskonetta ja saattaa ne käyttöön 30 EU-maassa. He kehittävät uusia kierrätysteknologioita, laitteita ja materiaaleja.

Ecological Recycling Complex -yrityksen (2023f) käsittelemä lasi vaikuttaa silmämääräisesti arvioiden puhtaalta. Myös mustat palat ovat lasia. Heidän lasiaan näkyy seuraavassa kuvassa.



Kuva 9. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää lasia (Ecological Recycling Complex 2023f).

PVB:n joukossa on nähtävissä hieman epäpuhtauksia. Tämä käy ilmi seuraavasta kuvasta. (Ecological Recycling Complex 2023g.)



Kuva 10. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää PVB:tä (Ecological Recycling Complex 2023g).

Granulaatti-muotoisessa PVB:ssä ei ole nähtävissä epäpuhtauksia. Tämä ei tosin välttämättä tarkoita, ettei niitä ole. Granulaatit näkyvät seuraavassa kuvassa. (Ecological Recycling Complex 2023h.)



Kuva 11. Ecological Recycling Complex -yrityksen käsittelemää PVB:tä granulaattina (Ecological Recycling Complex 2023h).

Seuraavassa kuvassa on Ecological Recycling Complex -yrityksen (2023j) tuulilasinkierrätyskone.



Kuva 12. Ecological Recycling Complex -yrityksen tuulilasinkierrätyskone (Ecological Recycling Complex 2023j).

2.4 Irrotusmenetelmät – Iso-Britannia

Brittiläisen Birminghamin yliopiston Dhaliwal & Hay (2002, 245–247, 253, 255) menetelmässä irrotettiin lasi PVB-kalvoista, sekoitettiin eri kierrätettyjä PVB-laatuja (tyyppejä) ja laminointiin lasi saavuttaen optinen kirkkaus, joka oli verrattavissa uuden PVB-kalvon käyttämiseen. Heidän menetelmässään lasi irrotetaan käyttämällä 5 paino-% etanolia ja PVB suodatetaan hienojakoisen hiekan läpi. Pehmittimen poisto tehdään n-heksaanilla. PVB-kalvot valmistetaan pyörityspäällästä 16×16 mm² polypropeeni-levyjen päälle 200 rpm 10 % liuoksia 30 min ajan liuoshaihdutuksella. PVB irtaantuu helposti PP-levyjen päältä. PVB-kalvoja käytettiin vakuumikuivauksen jälkeen. He myös selvittivät, että PVB sisälsi 20–25 paino-% pehmittimiä, ja että pääasiallinen pehmitin oli dibutyylisebacaatti (DBS).

(Dhaliwal & Hay 2002, 248) mukaan dibutyylisebakaan lisäksi pehmittimenä oli (englanniksi) 'butyl phenyl phthalate', jota oli kuitenkin merkittävästi vähemmän. Heidän mukaansa kummatkin ovat yleisiä pehmittimiä. Ilmeisesti jälkimmäinen aine on suomeksi bentsyylibutyyliftalaatti eli BBP (National institute of standards and technology 2025b).

Dhaliwal & Hay (2002, 246, 255) käyttivät myös erilaisia valmiita PVB-kalvoja, jotka he sekoittivat keskenään. PVB-kalvot sekoitettiin käyttäen Schwabenthan 2-valssimyllyä 5 min 140:ssä ja 150 °C:ssa. Saatua kreppi muovattiin 100×100 mm² suorakulmaisiksi arkeiksi 150°C:ssa hydrauliprässissä Moore E1127. Sekoittaessa eri PVB-laatuja (tyyppejä) voi pehmittimen häviäminen aiheuttaa ongelmia prosessoinnin olosuhteista riippuen. Tämä voidaan kuitenkin korjata lisäämällä dibutyylisebakaattia. Dhaliwal & Hay (2002) eivät ole artikkelissaan havainnollistaneet menetelmiään valokuvilla.

2.5 Irrotusmenetelmät – Etelä-Korea

Etelä-Korean Swain ym. (2015, 615, 619, 622) kehittivät ajoneuvon laminoidun lasin kierrätykseen mekanokemiallisen menetelmän, joka on taloudellinen ja ympäristöystävällinen. He kokeilivat useita eri menetelmiä sekä eri versioita lopullisesta menetelmästä, kunnes löysivät optimaaliset parametrit. Menetelmässä laminaattilasi upotetaan liuokseen, jota sekoitetaan. 30 tilavuus-% D201-kemikaaliliuoksen suhde jätelaminaattilasiin on n. 25. Lämpötila on 35 °C, sekoitusnopeus 400 rpm ja aika 60 min. Tämän jälkeen PVB ja lasi voidaan erotella kiinteä-neste-erottelulla. Sitten PVB:stä poistetaan pehmittimet 200–300°C lämpökäsittelyllä. Lopuksi kierrätetty PVB voidaan analysoida eri menetelmillä laadun selvittämiseksi ja neitseelliseen PVB:hen vertaamiseksi. D201 maksaa n. 2 500 e/tonni (Extrepure Resin (Shanghai) Co., Ltd. 2025). Vaikka kemikaali ei ole kovin kallista, on se kuitenkin ylimääräinen kustannuserä, joka kasvaa samassa suhteessa kierrätysmäärien kanssa, mikä vaikuttaa kannattavuuteen.

Kierrätetyssä PVB:ssä oli menetelmän käytön jälkeen 65,28 massa-% C ja 34,72 massa-% O, eli hiiltä ja happea. Siinä ei ollut lainkaan Si, Ca, Mg, Na tai Al tai mitään epäorgaanista yhdistettä. PVB oli siis 100 % puhdas lasista. Menetelmää testattiin edellä mainituilla parametreilla useita kertoja. Täysi erottelu onnistui jokaisella yrityksellä. (Swain ym. 2015, 619, 621.) Seuraavat kuvat havainnollistavat menetelmää ja sen tehokkuutta (Swain ym. 2015, 616, 621–622).

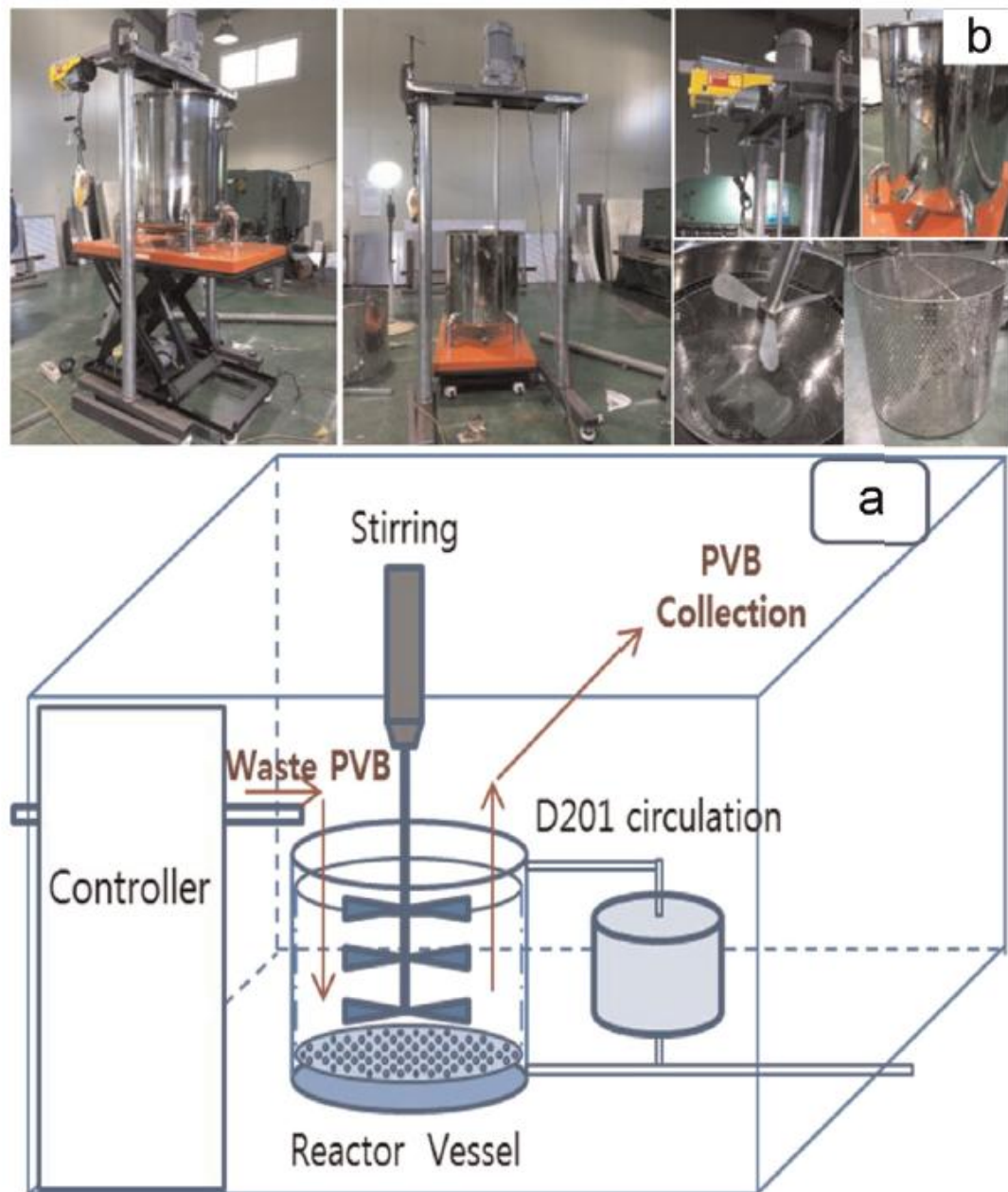


Fig. 1. (a) Schematic of mechanochemical reactor (b) mechanochemical reactor used for PVB and glass separation.

Kuva 13. Eteläkorealainen PVB-kalvon ja lasin erottelumenetelmä (Swain ym. 2015, 616).

Table 5

Elemental composition analysis for the recycled PVB and commercial PVB analyzed by EDS.

Element	Waste PVB (wt%)	Recycled PVB (wt%)
C	3.96	65.28
O	48.02	34.72
Na	9.30	0.00
Mg	2.12	0.00
Al	0.60	0.00
Si	29.56	0.00
Ca	6.44	0.00

Kuva 14. Eteläkorealaisen menetelmän tehokkuus (Swain ym. 2015, 621).

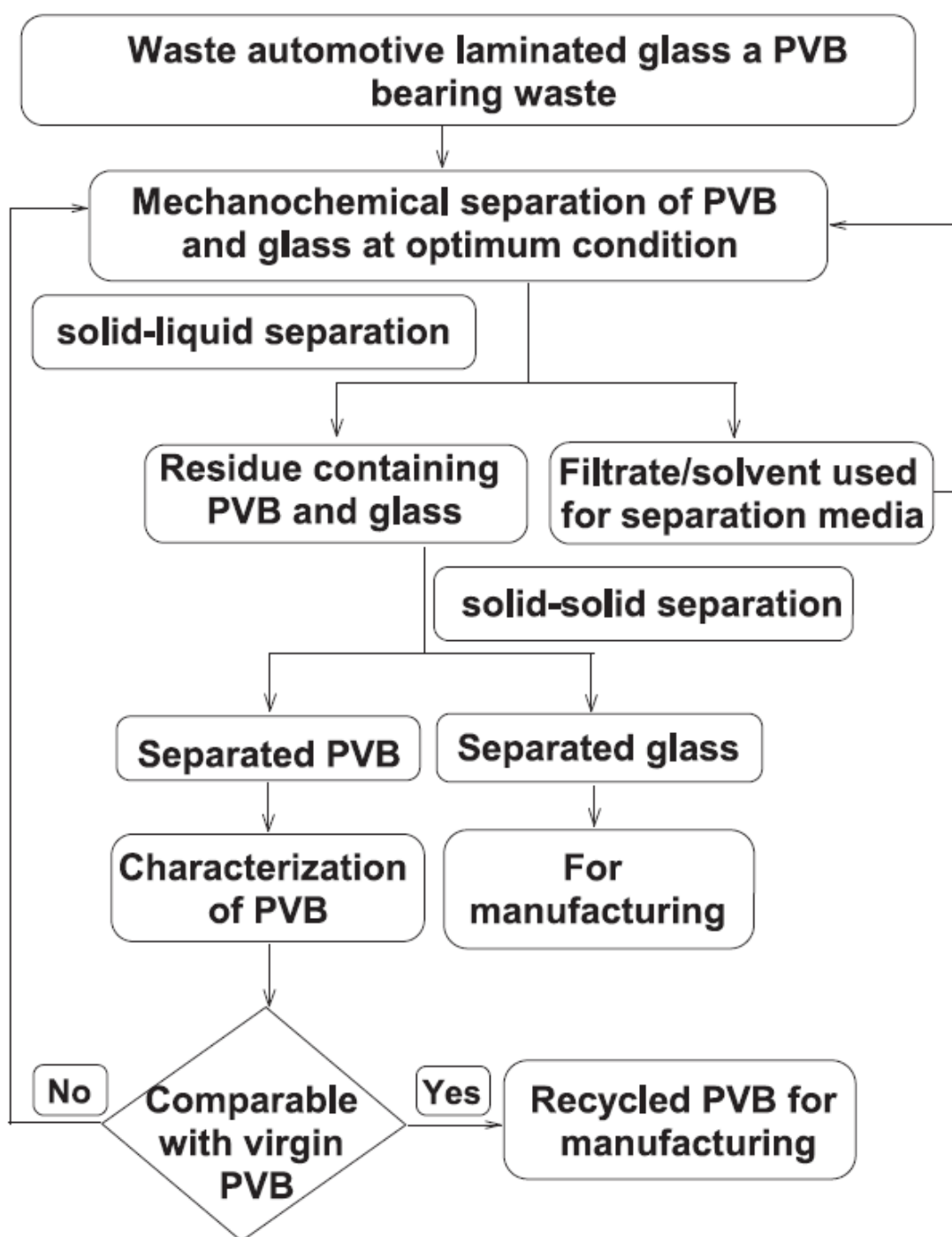


Fig. 10. Process flow sheet for valorization of waste automotive laminated glass and recycling of polyvinyl butyral (PVB) through mechanochemical separation.

Kuva 15. Eteläkorealainen prosessi (Swain ym. 2015, 622).

Swain ym. (2022, 2–3, 6–9) ovat kehittäneet myös tuoreemmassa tutkimuksessaan tuulilasin PVB:n ja lasin erottelun menetelmiä. He käyttävät tutkimuksessaan tuulilasia, jossa on sävytetty kalvo, PVB-kalvo, kaksi lasikerrosta ja kumireunus. He saavuttivat keskimäärin 98,86 %:n PVB:n talteenoton. Lasille vastaava luku oli 99,26 %. Prosessi on teknologisesti saavutettava ja ympäristöystävällinen. Menetelmillä PVB-kalvon tarkkaa saavutettua puhtautta ei kerrota, mutta puhtaus oli heidän mukaansa kuitenkin riittävä uudelleenvalmistukseen. Lasin saavutetuksi puhtaudeksi ilmoitetaan, että se on puhdasta niin, ettei siinä ole lainkaan PVB:tä, kumia tai sävytetyn kalvon kontaminaatiota.

Swain ym. (2015) aiemmassa tutkimuksessaan totesivat, että tehokas erottelu vaatii mekanokemiallisen menetelmän. Kuitenkin uudemmassa tutkimuksessaan Swain ym. (2022) onnistuivat tässä käyttäen pelkästään mekaanisia menetelmiä.

Swain ym. (2022, 2) mukaan ELV-tuulilasin lasin ja PVB:n kierrätystä ei ole juurikaan tutkittu. He mainitsevat Šooš ym. (2021) ja toisen tutkimuksen, mutta kritisoivat kumpaakin siitä, että teollisen mittakaavan ongelmia ei ole huomioitu. Lisäksi he antavat Šooš ym. (2021) tutkimuksesta kritiikkiä siitä, että PVB:n ja lasin erottelu voisi vaatia suuren määrän kemiallista puhdistusnestettä, joka voisi hankaloittaa erotteluprosessia ja olla haitaksi ympäristölle.

Omia prosessejaan Swain ym. (2022, 2) kuvaavat ainutlaatuisiksi teollisen mittakaavan kierrätysprosesseiksi. He kertovat, että heidän menetelmillään voidaan saavuttaa käsittelymäärä 1 600 t/vuodessa, kun lasketaan, että on 200 tuotantopäivää vuodessa, 8 työtuntia päivässä ja 8 tuotantotonnia päivässä.

Tämä vastaa siis 1 tonnia/tunti. Swain ym. (2022, 2) kutsuvat omia menetelmiään teollisen eivätkä pilotti-mittakaavan prosessiksi koska, prosessikehitys tehtiin massatuotantoon kykenevässä prosessissa.

Swain ym. (2022, 5–6) prosesissa tuulilasi laitetaan ensin silppuriin ja sitten murskataan vasaramyllyssä. Näin PVB-kalvo ja lasi muuttuvat pieniksi paloiksi. Murskauksessa lasista tulee kaksi erikokoista jätettä: alle mikroni-kokoinen ja

mikroni-kokoinen lasipöly. Silppuri ja vasaramylly ovat peräisin yritykseltä Woo Hyun Alloy, Korea. Seuraavaksi PVB ja lasi erotellaan mekaanisesti kolmessa vaiheessa. Ensin käytetään värähtelylaitetta. Jo tämän jälkeen mainitut kaksi lasijaetta on saatu puhdistettua. Sitten käytetään murskausta ja painovoimaerottelua PVB-kalvon, sävytetyn kalvon, kumin ja PVB-kalvoon jääneen lasin erotteluun. Painovoimaerottelu toimii hyvin, koska PVB-kalvon, sävytetyn kalvon ja lasipartikkelien tilavuuspainot ovat erisuuret. Tämän jälkeen PVB-kalvosta on saatu irrotettua suurin osa siihen jääneestä lasista. Myös sävytetty kalvo ja kumi on saatu irrotettua. Käytetyt laitteet ovat peräisin yritykseltä Hankook Powder Machine Engineering Co., Ltd, Korea.

Prosessin viimeisessä vaiheessa käytetään hydrodynaamista puhdistusta. Tähän käytetty laite on peräisin yritykseltä ANT21 Co., Ltd, Korea. Kyseessä on mekaaninen menetelmä, jossa sama laite ensin hankaa PVB-kalvosta lasia irti, sitten painepesee lasia irti vedellä ja lopuksi kuivaa. Näin PVB:stä tulee riittävän puhdasta uudelleenvalmistusta varten. Tämän laitteen on suunnitellut ANT21 Co., Ltd, Korea. (Swain ym. 2022, 6.)

Swain ym. (2022, 8) kertovat, että heidän prosessinsa etuna on sen yksinkertaisuus, niin että yleisesti saatavilla olevia teollisuuslaitteita voidaan muuntaa uuteen tarkoitukseen. He sanovat myös, että koska PVB-kalvoa ja lasia saadaan otettua talteen yli 98 %, on tämä määrä riittävä ollakseen kustannustehokasta teollisen mittakaavan kierrättämistä.

Prosessin haasteena voisi pitää sitä, että lasista tehdään tarkoituksella pölyä. Täten sen käsittely voi olla hankalaa. Seuraavassa on kuvia menetelmistä/laitteista.

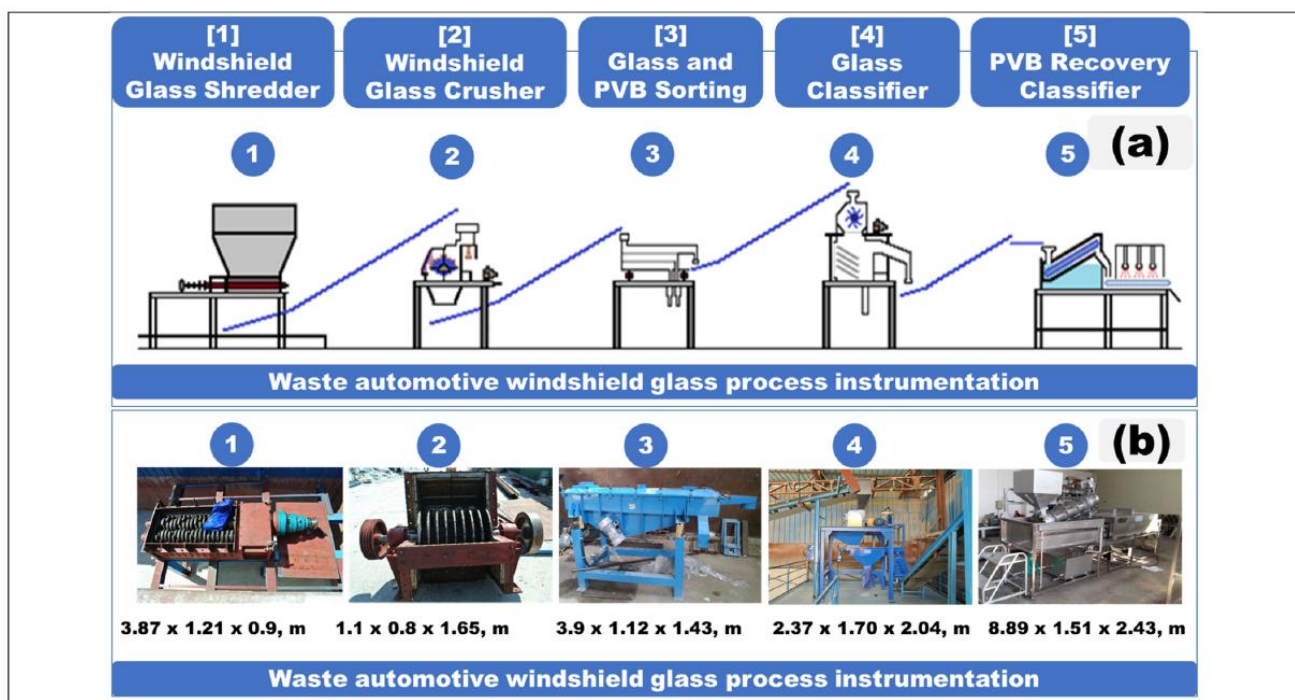


Fig. 2. (a) ELV windshield glass plant design, (b) Instrumentation used in the designed plant for ELV windshield glass recycling. The numbers reflect the instrumentation and the blue line indicate the conveyor belt. The dimensions of each instrument used are reflected below the figure in Figure (b). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

Kuva 16. Eteläkorealaisen linjaston laitteet (Swain ym. 2022, 4).

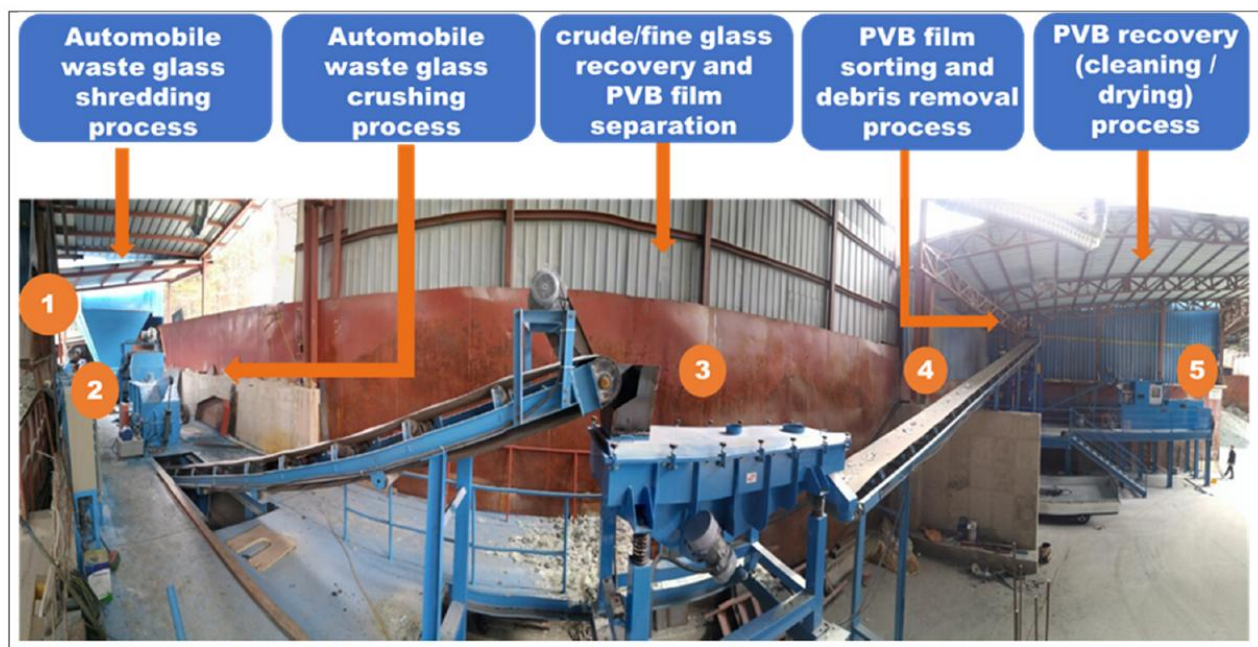


Fig. 3. Recycling plant view of ELV windshield glass.

Kuva 17. Eteläkorealainen linjasto (Swain ym. 2022, 5).



Fig. 4. Size reduction process for ELV windshield glass.

Kuva 18. Eteläkorealainen ELV-tuulilasin pienennysprosessi (Swain ym. 2022, 6).



Fig. 5. Mechanical separation and sorting of size reduced ELV windshield glass. The picture presented is not in proportionate scale, dimension reflects in Table 1.

Kuva 19. Eteläkorealaista erottelua (Swain ym. 2022, 7).

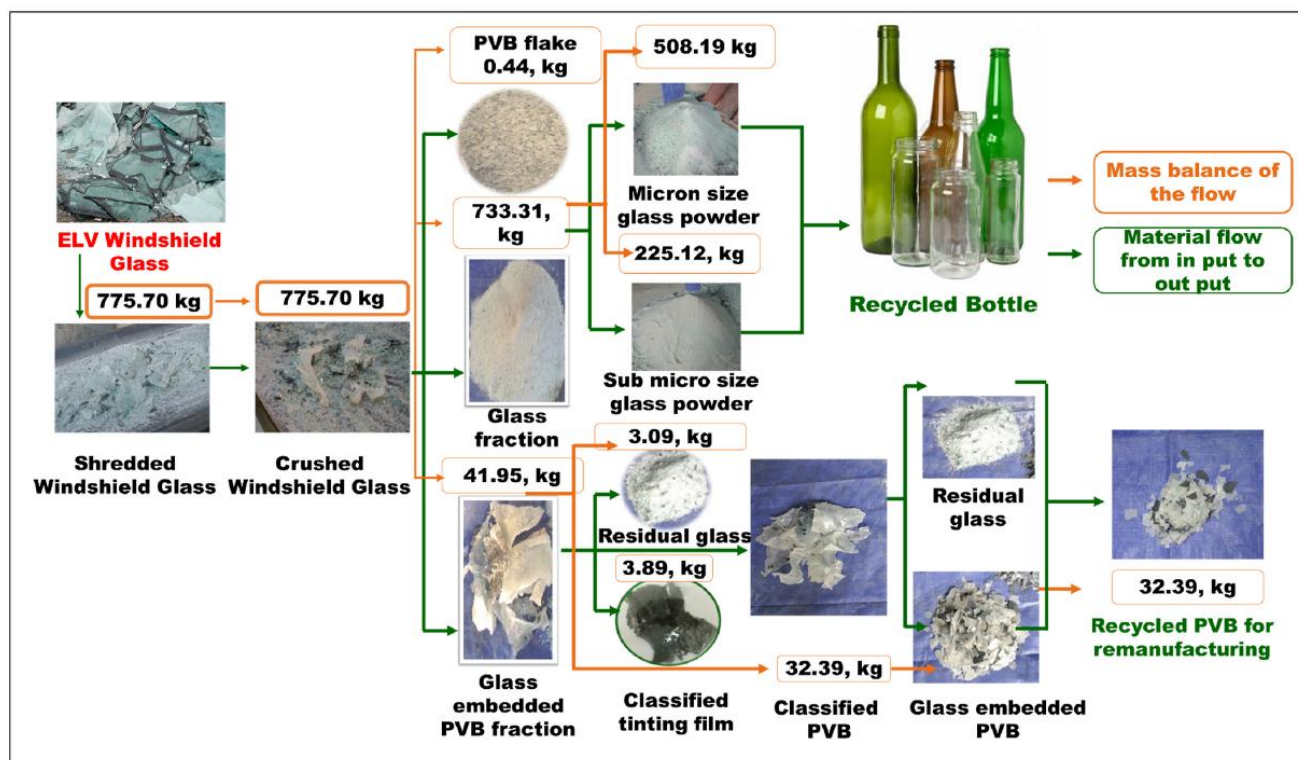


Fig. 7. Material flow and mass balance of size reduction and mechanical separation process for ELV windshield glass in the batch scale. (Mass balance derived from the average of five batches of recycling process).

Kuva 20. Eteläkorealaisen prosessin materiaalien massoja (Swain ym. 2022, 9).

2.6 Irrotusmenetelmät – Slovakia

Šooš ym. (2021) tutkimuksessa selvitettiin eri menetelmiä irrottaa laminoidun lasin PVB-kalvo ja lasi toisistaan. Yleisinä tavoitteina olivat, että menetelmät olisivat pienille ja keskisuurille yrityksille teknologisesti saavutettavissa ja kustannustehokkaita, kun laminoidun lasin vuosittainen käsittelykapasiteetti on 1 000–2 000 tonnia. PVB-kalvon osalta tavoitteena oli, että PVB-kalvo säilyy ehjänä, ja että siitä saadaan mahdollisimman puhdasta. Lasin osalta tavoitteena oli, että saadaan puhdasta sekä tasamuotoista- ja laatuista lasimursketta. Kummankin osalta tavoitteena oli, että niitä voitaisiin uusiokäyttää tehokkaasti myös suurta puhtautta vaativissa sovelluksissa.

Šooš ym. (2021, 1, 4–5) edustavat Slovakian teknillistä yliopistoa Bratislavassa ja ovat valmistaneet laitteistonsa yhteistyössä MAVEBA s.r.o -yrityksen kanssa. He käyttivät tutkimuksessaan tuulilasien paloja, joissa oli kaksi lasikerrosta,

joiden kunkin paksuus oli 2,5 mm. Nämä olivat tasolaseja, jotka oli ilmeisesti muokattu karkaistuksi. PVB-kalvona oli 0,76 mm paksu Trosifol® Standard.

"All the tested windshield samples were made from two float glass layers modified to heat-tempered glass and with a PVB interlayer of Trosifol® Standard." (Šooš ym. 2021, 5).

Tutkijat väittävät tutkimuksen lopuksi, että heidän laitteitaan käyttämällä voidaan saavuttaa taloudellisesti tehokkaasti 500–2 000 t/vuosi tuotantomäärä laminoidulle lasille. Lisäksi he kertovat, että sekä PVB-kalvoon että lasiin saatiin suuri puhtaus. (Šooš ym. 2021, 11.)

Aluksi Šooš ym. (2021, 5–6) suorittivat ensimmäisinä testeinä "esitestit", joilla he selvittivät, minkämuotoisia työkaluja lasin hajottamiseen kannattaa käyttää, paljonko voimaa lasin hajottaminen vaatii ja miten tehokkaita tietyt menetelmät ovat. Toisissa testeissään Šooš ym. (2021, 6–9) käyttivät eri menetelmiä, joissa oli hyödynnetty ensimmäisissä testeissä saatuja tietoja.

2.6.1 Ensimmäiset testit

1. vaihe: Puristinlaite (Šooš ym. 2021, 5–6)

Koekappale

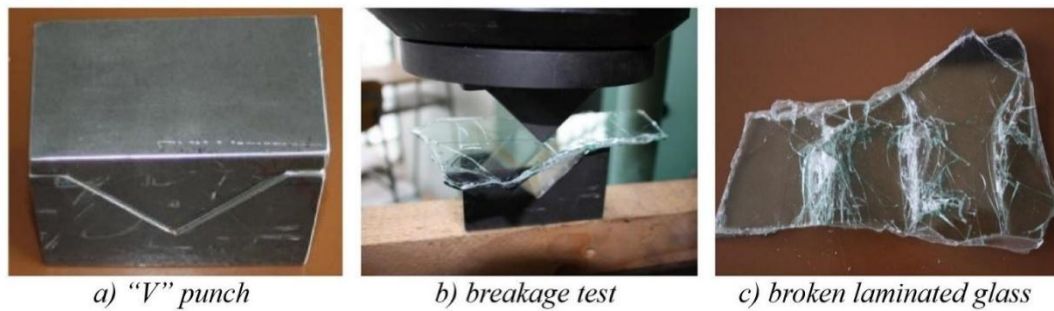
N. 100 x 70 mm pala tuulilasia.

Irrotuslaite/-menetelmä

Pyöreä S-puristin (& mekaaninen irrotus).

S-puristin on tehokkaampi särkeämään lasia kuin V-puristin.

S-puristimen säde on 50 mm.



Kuva 21. Slovakialainen V-puristin (Šooš ym. 2021, 5).



Kuva 22. Slovakialainen S-puristin (Šooš ym. 2021, 5).

Käsittely

Painetaan 5 kertaa n. 2 kN voimalla (ei tarvinnut niin suurta voimaa enää 5. kerralla).

Käännetään lasi 180° joka hajotuksen jälkeen.

(Irrotetaan lasi/lasia kalvosta mekaanisesti.)

Vaikutus

Lasi jää kiinni kalvoon, mutta vaatii hyvin vähän voimaa irrottaa.

Mitä opittiin

Tärkeää on selvittää hajotusvoiman suuruus (n. 2 kN), jolla lasi tehokkaasti särkyi samanmuotoisiksi ja -kokoisiksi paloiksi ilman, että PVB-kalvo hajoaa.

2. vaihe: Kuumuus (& mekaaninen irrotus) (Šooš ym. 2021, 6)**Koekappale**

N. 100 x 70 mm pala tuulilasia.

Irrotuslaite/-menetelmä

Kuumuus (& mekaaninen irrotus)

Käsittely

Hajonnut lasi altistetaan kuumuudelle.

(Lasin mekaaninen irrotus.)

Vaikutus

Kuumentamisen jälkeen vain alle 5 mm lasinpalat irtoavat helposti mekaanisesti PVB-kalvosta.

Mitä opittiin

Suurempia paloja on vaikeampi irrottaa tai irrotus ei onnistu.

3. vaihe: Kuumuus ja kylmä neste (& mekaaninen irrotus) (Šooš ym. 2021, 6)**Koekappale**

N. 100 x 70 mm pala tuulilasia.

Irrotuslaite/-menetelmä

Kuumailmapuhallin & -25 °C liuos metanolia ja tislattua vettä (& mekaaninen irrotus).

Käsittely

Käytetään kuumailmapuhallinta & heti perään injektoidaan lasin ja PVB-kalvon väliin $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ liuos metanolia ja tislattua vettä.

(Lasin mekaaninen irrotus.)

Vaikutus

Liuos hajottaa kiinnitysvoiman lopullisesti.

Lasi on helppo irrottaa.

Mitä opittiin

Kun puristinlaitteen jälkeen käytetään kuumailmapuhallinta ja heti perään kylmää liuosta, voidaan lasinpalat irrottaa helposti, koska liuos pääsee yksittäisten lasinpalojen alle.

2.6.2 Toiset testit

1. vaihe: Jauhaminen mekaanisella värinällä (Šooš ym. 2021, 6–7)



Kuva 23. Slovakialainen värinälaite (Šooš ym. 2021, 6).

Koekappale

395 x 295 mm pala tuulilasia (6 näytettä).

Irrotuslaite/-menetelmä

2 kpl rautalevyä 400 x 400 mm ja värähtelijä.

Levyt ovat pystyssä.

Pohjalevy on kiinteästi kiinni "pöydän" kyljessä.

Levyjen yhdessä päässä on levyjä yhdistävät jouset.

Levyjen välissä on reunoilla palkit, joissa on saranat, jotka kiinnittyvät ylälevyyn eri päästä kuin jouset.

Ylemmän levyn päällä on värähtelijä (0.18 kW, 2880 rpm, "centrifugal force" 2.26 kN).

Levyjen välissä työstöpinta koostuu halkaisijaltaan 10 mm lieriösauvoista. Ne näyttävät harjateräkseltä ja että ne on hitsattu kiinni levyyn, ja ovat 400 mm pitkiä.

Lieriösauvoja on kuvassa 23 näkyvissä 8 kpl pohjalevyllä. Jos raot ovat myös 10 mm, niin sauvojen ja rakojen kokonaisosuus levystä olisi: sauvat 8x10 mm + raot 7x10 mm = 150 mm, joka olisi 37,5 % levyn pinnasta (150 mm / 400 mm). Lieriösauvat kattavat siis n. 1/3 levyn pinnasta, kun lasketaan mukaan sauvojen väliset raot.

Ylälevyyn on kiinnitetty sisäpintaan myös jonkinlainen palkki, joka ilmeisesti toimii lieriösauvojen vastinkappaleena, ja ilmeisesti näiden väliin asetetaan PVB-lasi (395 x 295 mm pala tuulilasia).

Käsittely

Ajetaan lasi läpi 3 kertaa per puoli, eli yht. 6 kertaa.

Lasi tippuu alla olevaan keräysastiaan.

Vaikutus

Lasia irtoa enemmän jokaisen läpiajon jälkeen.

Mitä opittiin (Šooš ym. 2021, 7–8)

Tutkimuksen 2. testeissä käytetään 1. vaiheessa mekaanista värinälaitetta.

Laitetta käytettäessä tuulilasinäytteen paino putoaa keskimäärin 1 288 g:sta 101 g:aan.

Laite jauhaa lasimurskeen 5 eri kokoluokkaan.

Halkaisijaltaan erisuuruisten partikkelien osuudet irrotetun lasimurskeen painosta ovat likimain samat kaikissa näytteissä.

Seuraavassa on lasimurskeen keskimääräinen painojakauma halkaisijan mukaan ja silmämääräiset huomiot sirujen väitetystä koosta:

- alle 0,5 mm: 17,7 %
 - silmämääräisesti sirut ovat alle 0,5 mm, lähes pölymäistä lasimursketta
- 0,5–1 mm: 13,8 %
 - sirut näyttävät siltä, että voivat olla enimmäkseen n. 0,5–1 mm leveitä, mutta monet ovat 1,5–2 mm leveitä ja pitkiä
- 1–2 mm: 28,8 %
 - sirut enimmäkseen 1–2 mm leveitä, mutta jotkin ovat 3–4 mm pitkiä
- 2–4 mm: 36,2 %
 - sirut korkeintaan 4 mm leveitä, mutta useat sirut ovat selvästi yli 4 mm pitkiä, jotkin jopa yli 10 mm pitkiä
- yli 4 mm: 3,5 %
 - sirut enimmäkseen 5–10 mm leveydeltään ja pituudeltaan.

Lasimurskeen massasta siis 31,5 % on 1 mm tai sen alle.

Massasta 65,0 % on halkaisijaltaan 1–4 mm.

Massasta 3,5 % on yli 4 mm.

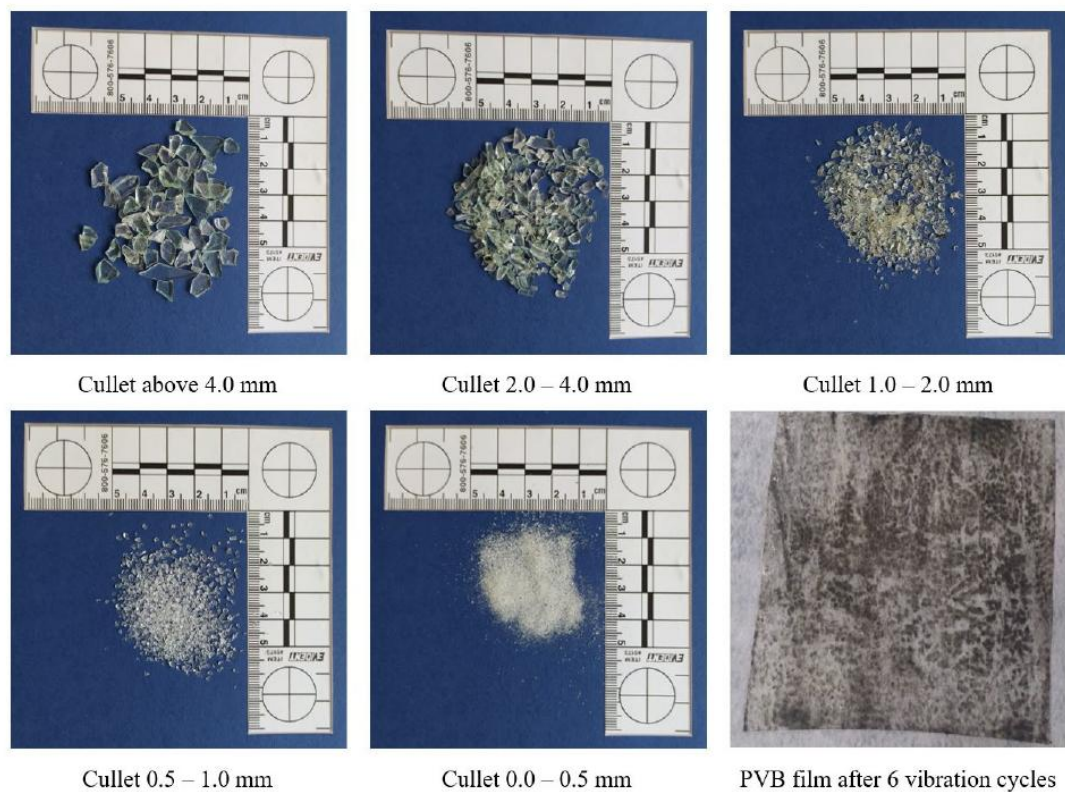


Figure 5. Samples of glass cullet after sieve analysis, and the final polyvinyl butyral (PVB) inter-layer film.

Kuva 24. Slovakkialaisten menetelmien tuottamaa lasimursketta (Šooš ym. 2021, 8).

Vaikuttaa, että kokoluokkien millimäärät eivät ole ehdottoman tarkkoja, vaan suuntaa antavia. Lasimurske on kuvan 24 perusteella yleisesti vähän kookkaampaa kuin luvut väittävät. Mursketta on kuitenkin selvästi 5:ttä eri kokoluokkaa.

2. vaihe: PVB-kalvon pesu (Šooš ym. 2021, 9, 11)

Koekappale

395 x 295 mm pala tuulilasia (6 näytettä).

Irrotuslaite/-menetelmä

Astiassa lämmitetään 60 °C:een liuos, jonka ainesosat ovat vesi ja kalsiumkloridi (700 mL H₂O, 280 g CaCl₂).

PVB-kalvon pesussa käytettävää kalsiumkloridia käytetään tiesuolana. Se on melko edullista, n. 0,50–0,60 e/kg. (Hankkija Oy 2025; Vehmaan PK-Puu Oy 2025.)

Käsittely

PVB-kalvoa liotetaan liuoksessa 5 min ajan ja pestään käsin.

Vaikutus

Liuotus ja pesu irrottavat (ainakin lähes kaikki) loput lasinpalat ja lasipölysiirpaleet.

Mitä opittiin

N. 99,85 % lasista saadaan irti ja talteen käyttämällä mainittua mekaanista (värinä)menetelmää ja kemiallista pesua.

Voidaan olettaa, että käsinpesu rajoittaa kustannustehokasta käyttöä. Toisaalta pesun voisi varmaan automatisoida esim. käyttämällä automaattisia harjoja kuten autopesulassa.

Alkuperäisen puhtaan PVB-kalvon keskimääräiseksi painoksi näytteissä saadaan laskutoimitusten avulla 94,75 g. PVB-kalvon pesun jälkeen painoksi mitataan 96,72 g. Mitatun ja lasketun painon ero on $96,72 \text{ g} - 94,75 \text{ g} = 1,97 \text{ g}$. (Šooš ym. 2021, 9).

$(1,97 \text{ g} / 1288 \text{ g}) * 100 \% = 0,15295... \% \approx 0,15 \%$. PVB-kalvon puhtaus ja talteen saatu lasi on $100 \% - 0,15 \% = 99,85 \%$ (Šooš ym. 2021, 9, 11).

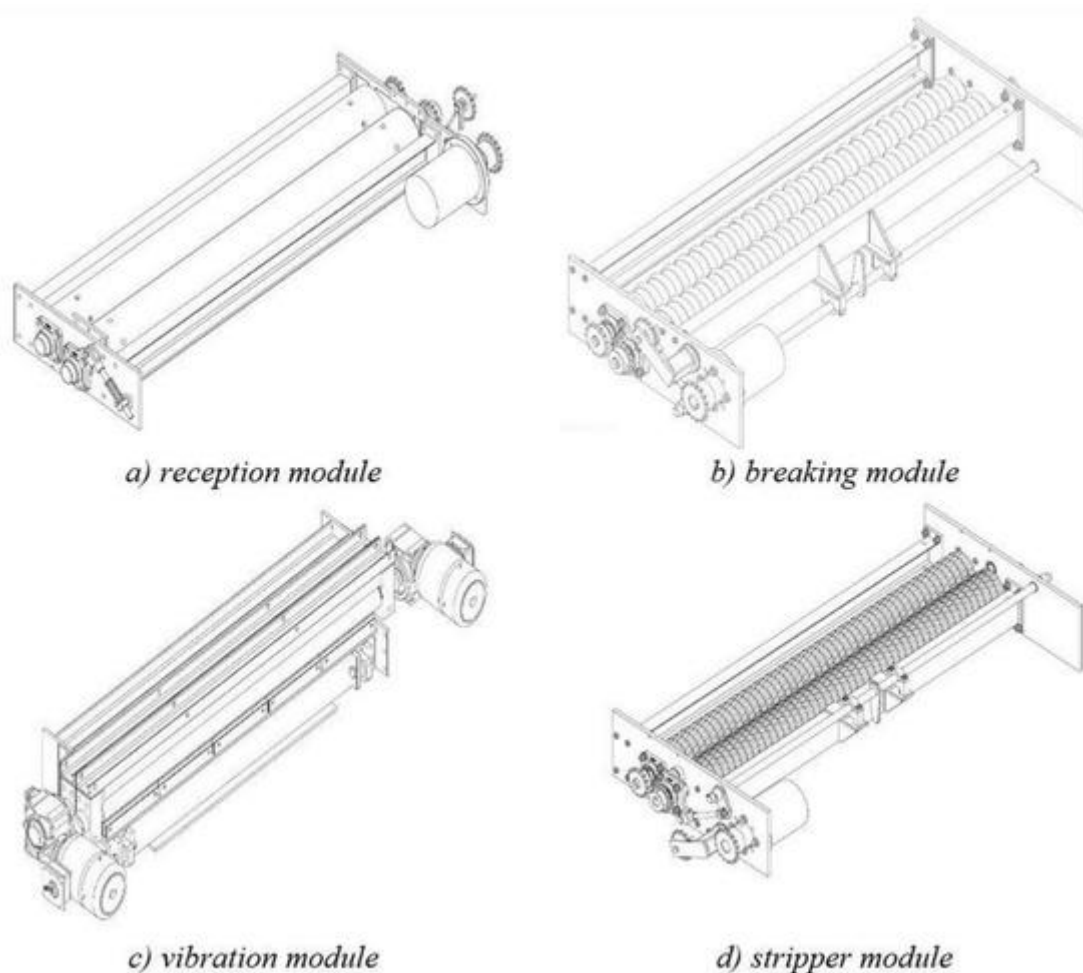
Šooš ym. (2021, 11) väittävät, että PVB-kalvoon jää lasia vain enintään 100 ppm. Tämä vastaa 1/10 000 eli 0,01 %, joka on 1288 grammasta 0,1288 g.

Kalvoon jäi kuitenkin 1,97 g ylimääräistä painoa eli 0,15 % eli 15-kertainen määrä ($1,97 \text{ g} / 0,1288 \text{ g}$). Ylimääräisen painon voi selittää, että aiemmin mainittu lukema 94,75 g on saatu laskutoimitusten avulla, joten se ei ole tarkka. Voi myös olla, että PVB-kalvoon on jäänyt muitakin epäpuhtauksia kuin lasia.

3 Slovakialainen linjasto

Šooš ym. (2021, 5–11) kehittivät testiensä perusteella linjaston, joka koostuu monivaiheisesta kokoelmasta erilaisia moduuleja. Nämä moduulit pystyvät toimimaan sekä itsenäisesti että yhdessä. Niitä voidaan yhdistellä ja räätälöidä asiakkaiden tarpeiden mukaan.

Slovakialaisessa linjastossa on tiedossa tarvittavat irrotuslaitteet/metodit ja niiden järjestys. Menetelmien etuna on, että ne eivät ole niin äänekkäitä ja pölyisiä kuin perinteisemmät mekaaniset menetelmät. Lisäksi moduläärinen teknologia on liikuteltavissa. (Šooš ym. 2021, 9–11.)



Kuva 25. Neljä moduulia (Šooš ym. 2020a; Šooš ym. 2020b, 9–12; Šooš ym. 2021, 10).

3.1 Minimi-linjasto – täysin mekaaninen erottelu: A, B, C

Minimilinjastossa käytetään moduuleita, joissa on kaikissa vain mekaanista erottelua. Rikkomismoduulissa (A) hajotetaan lasi profiili-valsseilla (muotoilluilla rullilla) poikittais- ja pituussuunnassa. Värinämoduulissa (B) värisytetään lasia pyramidi-neulojen välissä. Kuorintamoduulissa (C) PVB-kalvo puhdistetaan mekaanisesti kuorintavalsseilla erilaisilla frekvensseillä. Minimilinjastossa moduulit ovat järjestyksessä A, B, C (Šooš ym. 2021, 10):

1. moduuli: Rikkomismoduuli (A)
2. moduuli: Värinämoduuli (B)
3. moduuli: Kuorintamoduuli (C).

3.2 Pitkä linjasto – myös kemiallinen erottelu: D, A, A, B, B, C, E

Pitkä linjasto soveltuu paksuille ja monilaminoiduille lasille. Vaiheita toistetaan tarpeen mukaan. Prosessin tehokkuuden lisäämiseksi käytetään myös vastaanottomoduulia ja PVB-kalvon puhtauden lisäämiseksi pesumoduulia. (Šooš ym. 2021, 10–11.)

Vastaanottomoduulissa (D) on kaksi sileää valssia. Pesumoduulissa (E) suoritetaan pesu kuumennetussa vesiliuoksessa, jonka koostumus on 700 mL H₂O, 280 g CaCl₂ ja lämpötila on 60 °C (Šooš ym. 2021, 9). Pitkässä linjastossa moduulit ovat järjestyksessä D, A, A, B, B, C, E (Šooš ym. 2021, 10–11):

1. moduuli: Vastaanottomoduuli (D)
2. moduuli: Rikkomismoduuli (A)
3. moduuli: Rikkomismoduuli (A)
4. moduuli: Värinämoduuli (B)
5. moduuli: Värinämoduuli (B)
6. moduuli: Kuorintamoduuli (C)
7. moduuli: Pesumoduuli (E).

On myös mahdollista käyttää esimerkiksi linjastoa A, B, C, E, jossa E-moduuli onkin puhallusmoduuli ilmasuutinjärjestelmällä (ei löydy kuvaa).

Puhallusmoduuli kohdistetaan PVB-kalvoon. Tällainen E-moduuli on myös linjastoissa D, A, B, C, E ja D, A, A, B, B, C, E. Tällaisissa linjastoissa ei ole pesumoduulia. Näillä linjastoilla voidaan saada PVB-kalvosta irti vain 96 % lasista. (Šooš ym. 2020a; Šooš ym. 2020b, 4–5, 7, 9–12, 14.)

4 Puhtaus ja käyttökohteet

Šooš ym. (2021, 2–3) mukaan täysi puhtaus PVB-kalvon ja lasin erottelussa vaatii märkää eli kemiallista menetelmää. PVB-kalvon tarttumiskykyä täytyy vähentää lisäämällä kalvon vesipitoisuutta, mutta tämä on kuitenkin ongelmallista taloudellisen tehokkuuden kannalta. Swain ym. (2015, 617–618) mukaan mekaaninen erottelu tai kemiallinen prosessi eivät kumpikaan yksinään riitä, vaan pitää käyttää mekanokemiallista erotteluprosessia.

4.1 Puhtaus ja käyttökohteet lasille

Suuri puhdas lasimurske sopii suoraan lasiteollisuuteen lasituotteiden valmistukseen. Jätelasi eri lasimurskan kokojakaumilla ja puhtauksilla sopii rakennusteollisuuden tuotteisiin, esim. betoni, laastit, rakennusmateriaalit. (Šooš ym. 2021, 3.) Lasipöly sopii vaahtolasiin rakennusten lämpöeristykseen ja akustiseen eristykseen (Šooš ym. 2021, 3; Ecological Recycling Complex 2023a).

Kierrätyslasilla on oltava riittävä puhtaus ja sopiva raekoko, jotta lasia voidaan käyttää korkean suorituskyvyn sovelluksissa. Lasissa pitäisi olla alle 1 % epäpuhtauksia ja kalvoja. Raekoon pitäisi olla 0–5 mm. Kun erotellaan PVB-kalvoa ja lasia toisistaan, voidaan lasista saada korkealla puhtaudella talteen 99,85 % käyttämällä Slovakian teknillisen yliopiston Bratislavassa ja MAVEBA s.r.o -yrityksen laitteita. (Šooš ym. 2021, 4, 11.)

Laxmi Polymers (2021b) väittää, että heidän lasinsa on niin puhdasta, että sitä voi käyttää suoraan ilman pesua, koska siinä ei ole mitään epäpuhtauksia, ja että se soveltuu rakennusten sävytettyjen tasolasien valmistukseen. Yritys kertoo tekevänsä yhteistyötä lasintutkimusinstituuttien kanssa, jotta voisivat valmistaa lasivillamattoja, vaahtolasia ja lasikoriste-esineitä.

Täytyy huomioda, että vaikka väitettäisiin, että alle 1 % epäpuhtaudet ovat riittävä puhtausaste, jotta kierrätettyä lasia voitaisiin käyttää tasolasissa, ei asia

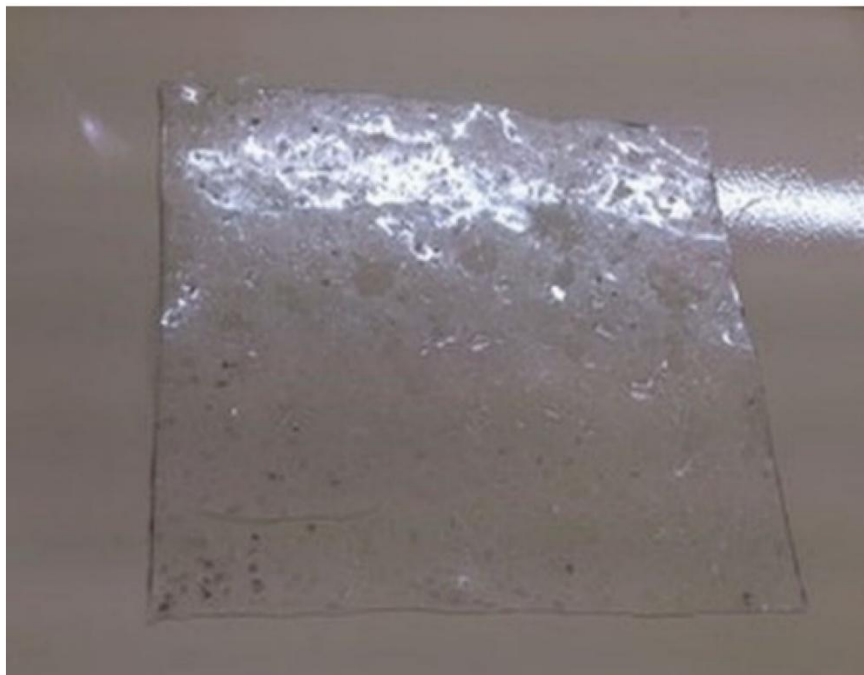
ole kuitenkin niin yksinkertainen. Asia ei ole kiinni vain epäpuhtaus-%:sta, vaan siitä, mitkä epäpuhtaudet ovat kyseessä. Alumiini ja ruostumaton teräs ovat nimittäin epäpuhtauksina todella suuri ongelma lasissa. Niitä ei saa poistettua magneetilla, ja ne voivat epäpuhtauksina aiheuttaa merkittäviä häiriöitä sulatusuunissa. Nämä voivat johtaa päivien tai viikkojen menetettyyn tuotantoon. (NGA National Glass Association with GANA 2014, 2.) Myös Foamit Group:in (2025) tytäryhtiön Uusioaines Oy:n lasiliiketoiminnan johtaja Ilkka Rekolainen kertoo Meriaura Oy:n (2024) blogissa, että uuden lasin valmistuksessa epäpuhtauksia sallitaan vain grammoja per tonni, ja että metallit on poistettava.

NGA National Glass Association with GANA (2014, 4–5) mukaan kierrätettyä lasia käytetään paljon lasikuitueristeissä sekä lasihelmien muodossa autoteiden maalattavien viivojen pinnalla luomaan heijastava pinta. Lasimurskaa käytetään mm. metallipintojen hiomisessa puhtaiksi ennen niiden maalaamista.

4.2 Puhtaus ja käyttökohteet PVB-kalvolle

Šooš ym. (2021, 4, 9, 11) väittävät, että heidän menetelmillään saavuttaa tuulilasin erottelussa 99,85 % tehokkuuden, mutta myös, ehkä ristiriitaisesti, että kiinnijäävää lasia on kuitenkin vain 100 ppm. Heidän mukaansa kun kierrätetyssä PVB-kalvossa on korkeintaan 100 ppm eli 0,01 % kiinnijäävää lasia, PVB-kalvosta voidaan valmistaa uutta laminoidun lasin PVB-kalvoa. Tämä max 100 ppm PVB:hen kiinnijäävää lasia voidaan väitetysti saavuttaa käyttämällä Slovakian teknillisen yliopiston Bratislavassa ja MAVEBA s.r.o - yrityksen laitteita. Kierrätetty PVB-kalvo voidaan valmistaa uudeksi laminoidun lasin PVB-kalvoksi käyttämällä ekstruusiota eli suulakepuristusta. Kuten aiemmin on selvinnyt, myös ainakin Swain ym. (2015) sekä Dhaliwal ja Hay (2002) ovat onnistuneet erottelemaan PVB-kalvon ja lasin niin, että PVB-kalvoa on voitu käyttää lasin laminointiin. Laxmi Polymers:in (2021d) mukaan kierrätettyä PVB:tä ei voi käyttää uuden PVB-kalvon valmistamiseen useammasta "teknisestä syystä". Voidaan siis päätellä, että he eivät vain ole onnistuneet siinä.

Seuraavassa on kuva Šooš ym. (2021, 9) käsittelemästä PVB-kalvosta.



Kuva 26. Slovakialaisittain käsiteltyä PVB-kalvoa (Šooš ym. 2021, 9).

Laxmi Polymers valmistaa kierrätetystä PVB-kalvosta kuitenkin esimerkiksi automattoja, maaleja, pohjamaaleja, kenkiä, lattianpäällysteitä, mattoja ja nahkakäsilaukkuja (Laxmi Polymers 2021c; Insider Cars 2023). Laxmi Polymers:in (2021c–2021d) PVB:stä voi myös valmistaa liimaa, ja heidän PVB-kalvoaan voi käyttää leikkikenttiin. Laitteistoilla saavutettava PVB-kalvon puhtaus on alle 1 % lasia (Laxmi Polymers 2021a). Tämä taso on siis ilmeisesti riittävä edellä mainittuihin tuotteisiin. Myös Swain ym. (2022, 8) mukaan kierrätettyä PVB-kalvoa voidaan käyttää maaliteollisuudessa. NGA National Glass Association with GANA (2014, 5) mukaan suurin kierrätetyn PVB-kalvon kuluttaja on mattoteollisuus, joka käyttää PVB:tä osana maton alapuolta.

Dhaliwal & Hay (2002, 246, 253, 255) tutkimuksen mukaan eri PVB-laatuja (tyyppejä) voidaan sekoittaa keskenään laadun (käytettävyyden) kärsimättä. Sekä käyttämättömän ja kierrätetyn PVB:n sekoitusta että pelkkää kierrätettyä PVB:tä voidaan käyttää lasin laminointiin. Kummassakin tapauksessa on

mahdollista saavuttaa samankaltainen laminoidun lasin optinen kirkkaus kuin käytettäessä käyttämätöntä PVB-kalvoa.

PVB-kalvoa voidaan käyttää aurinkokennoissa tuomaan niille suojaa kosteudelta ja heikentymiseltä, mikä pidentää niiden käyttöikää (Ahmad ym. 2013, 109). Kierrätetystä PVB-kalvosta voi valmistaa myös saappaita ja turvakenkiä (Interzero Slovenia 2023). Kierrätettyä PVB:tä voidaan käyttää myös Li-pohjaisissa akuissa katodin ja anodin erottavana kalvona (Porporato ym. 2025, 1–3, 9–10).

Ecological Recycling Complex (2023a) mukaan (ilmeisesti kierrätetystä) PVB:stä voidaan valmistaa luodinkestävää PVB-levyä sekä universaaleja paneeleja, joita voidaan käyttää rakentamisessa käyttökohteissa kuten:

- ulkoseinien verhous
- sisäseinien verhous
- kaapinkalusteet
- mainosrakenteet
- nopeasti koottava aita
- terassipöytä
- osoitekyltit
- modulaarinen eristetty seinäpaneeli nopeasti valmistettavassa rakennuksessa.

Kierrätettyä PVB:tä voidaan myös mahdollisesti käyttää autolasin kierrätyslaitteen valmistusmateriaalina. Tällaisen on määrä valmistua vuoden 2025 loppuun mennessä. (Ecological Recycling Complex 2023a–b.)

Kun on kyse PVB-kalvon riittävästä puhtaudesta sekä ylipäättään että eri käyttökohteisiin, on syytä huomioida alueellisen kontekstin vaikutus kierrätetyn PVB:n liiketoimintamahdollisuuksiin. Esimerkiksi Intiassa tai Kiinassa on PVB:n eri ainesosien ja epäpuhtauksien turvallisuuden suhteen oletettavasti vähemmän tiukka lainsäädäntö kuin EU:ssa. Samoin on oletettavaa, että em. maissa on vähemmän tiukat vaatimukset tuotteiden kulutuskestävyydelle ja säilyvyydelle sekä kestävän kehityksen periaatteiden noudattamiselle.

5 Benchmark PVB-kalvon irrottamismenetelmistä

Kaiken kaikkiaan intialaisten ja kiinalaisten sivustojen, kuvien ja videoiden perusteella vaikuttaa siltä, että heidän käyttämänsä menetelmät/koneet ovat varsin samankaltaisia. Niiden tuulilasin käsittelykapasiteetit ovat korkeat. Myös PVB-kalvossa ja lasissa saavutettu puhtaus ovat samankaltaisia. PVB-kalvot näyttävät varsin lasittomilta, mutta tämä ei tarkoita, etteikö niissä olisi liikaa lasia tai muita epäpuhtauksia uuden tuulilasin laminaatin materiaaliksi. Lisäksi PVB-kalvojen käsittely vaatii suhteellisen paljon manuaalista työtä ja siirtelyä. Lasimurskeeseen jää intialaisilla alle 1 % ja kiinalaisilla 1 % epäpuhtauksia. On luultavaa, ettei lasimurskeesta voida ilman jatkokäsittelyä – jos taloudellisesti sittenkään – valmistaa ainakaan kovin laadukasta tasolasia, saati sitten tuulilaseihin soveltuvaa, tiukat turvallisuustandardit täyttävää lasia.

Tasolasin valmistajat eivät tyypillisesti käytä kierrätettyä lasia. Syinä tähän ovat poikkeavuudet lasikoostumuksessa ja mahdollinen epäpuhtaus. Lasimurske, joka on peräisin erilaisista koostumuksista, voi johtaa mittaviin vikoihin valmistuksen aikana. (NGA National Glass Association with GANA 2014, 2.)

Intialaisten käsittelykapasiteetti on 100–150 tai 200–300 tonnia tuulilasia kuukaudessa. Suuremman kapasiteetin laitteistolla tämä on jopa 5–20 tonnia tunnissa.

Kiinalaisilla laitteilla kapasiteetti on hintavilla laitteilla mallista riippuen 400–1200 kg/h. Hintavalla linjastolla tämä on tyypistä riippuen 200–300 kg/h...800–1400 kg/h. Parhaimmillaan kapasiteetti on 8–10 tonnia tunnissa.

Sveitsin pieni tuulilasinkierrätyskone on muista poikkeava tapaus pienen kokonsa ja pelkistetyn ulkonäkönsä puolesta. Ilmeisesti yksi laite hoitaa kaiken erottelun/kierrätyksen. Sen kapasiteetti 50 tonnia/vuoro vaikuttaa yllättävän suurelta. Koneen toimintatavasta ei selviä juuri mitään valmistajien sivustolta. Sitä voi lähinnä arvailla harvoista kuvista.

Iso-Britannian menetelmissä keskityttiin lähinnä tutkimaan eri PVB-kalvojen sekoittamista keskenään. Käsittelykapasiteettia ei ole mainittu.

Etelä-Korean menetelmillä voidaan saavuttaa 1 600 t/vuodessa. Oletuksina on, että tuotantopäiviä on 200/vuosi, työtunteja 8/päivä ja tonneja 8/päivä. Tällöin käsittelynopeus on siis 1 tonni/tunti.

Slovakian menetelmillä arvioidaan saavutettavan 500–2 000 tonnia/vuosi.

Etelä-Korea ja Slovakia muistuttavat toisiaan siinä, että molemmat pyrkivät kehittämään yksinkertaisia menetelmiä, jotka ovat taloudellisesti kannattavia verrattain matalilla PVB-kalvon ja lasin käsittelymäärillä. Lisäksi molemmat pyrkivät kuitenkin myös korkeaan puhtauteen.

Seuraavassa taulukossa on yhteenveto tuotantokapasiteeteista.

Taulukko 2. Tuotantokapasiteetit tuulilasin käsittelylle

Maa	Kapasiteetti	Tarkenne
Intia	5–20 t/h	Laxmi Polymers: 200–300 t/kk eli 1,5–2,25 t/h... tai jopa 5–20 t/h
Kiina	8–10 t/h	Nanjing ja Suzhou: 0,2–1,4 t/h; SUNY Group: 8–10 t/h
Sveitsi	6,25 t/h	Ecological Recycling Complex: 50 t/8h = 6,25 t/h
Iso-Britannia	N/A.	Ei ilmoitettu käsittelykapasiteettia.
Etelä-Korea	1 t/h	1 600 t/vuosi eli 1 t/h
Slovakia	0,3125–1,25 t/h	500–2 000 t/vuosi eli 0,3125–1,25 t/h

Taulukon kaikki t/h-määrät on laskettu oletuksella, että vuodessa on 200 työpäivää à 8 h. Oletus on saatu Swain ym. (2022) tutkimuksesta, jossa oletusta käytettiin.

Lopuksi on vielä seuraavassa taulukossa likimääräinen benchmark-vertailu eri maiden menetelmien välillä. Etelä-Koreaa tarkastellaan Swain ym. (2022) uudemman tutkimuksen perusteella. Vertailtavina ominaisuuksina ovat hinta, kapasiteetti, puhtaus ja teknologia. Kapasiteeteista tai niiden arvioista oli helpoin löytää tietoa, ja ne olivat edellä mainittujen mukaiset. Asteikkona ominaisuuksissa on matala, keskisuuri, korkea. Kyseessä eivät ole absoluuttiset, vaan relatiiviset arviot eri maiden menetelmien suhteesta toisiinsa.

Hinnassa on pyritty huomioimaan sekä investoinnin suuruus että käyttökustannukset. Tämä on kuitenkin tehty rajallisella tiedolla.

Tiedon rajallisuus koskee myös puhtautta, jossa on pyritty huomioimaan kauppiallinen kehuminen ja se, mitä tarinaa kuvat kertovat. Arviot perustuvat siis osittain siihen, mitä yritykset ovat kertoneet ja osittain siihen, minkälaisina PVB:n ja lasijakeen puhtausasteet näyttäytyvät kuvien perusteella. Puhtautta tarkastellaan siis yhteisesti PVB:n ja lasin kannalta. Syy tähän on se, että ne vaikuttavat kulkevan käsi kädessä. Toisin sanoen, jos yritys tai tutkijat ovat tavoitelleet ja saavuttaneet korkean puhtauden PVB:ssä, he ovat tehneet saman lasin suhteen. Samoin matala laatu yhdessä kielii matalasta laadusta myös toisessa.

Teknologiaakin koskevat arviot on tehty rajallisella tiedolla. Teknologia viittaa siihen, miten yksinkertaisilla vs. monimutkaisilla laitteilla ja menetelmillä PVB-kalvon ja lasin erottelu on toteutettu, ja onko tähän sisältynyt kemikaalien käyttöä tai paljon analysointilaitteiden käyttöä.

Taulukko 3. PVB-kalvon irrottamismenetelmien benchmark luku 5

	Intia	Kiina	Sveitsi	Iso-Britannia	Etelä-Korea	Slovakia
Hinta	Korkea	Korkea	Matala/ Keskisuuri?	Keskisuuri?	Matala	Matala
Kapasiteetti	Korkea	Korkea	Korkea	Matala	Matala	Matala
Puhtaus	Matala/ Keskikorkea	Matala/ Keskikorkea	Keskisuuri/ Korkea?	Korkea	Korkea	Korkea
Teknologia	Matala	Matala	Keskisuuri/ Korkea?	Keskisuuri/ Korkea	Matala	Matala

Lähteet

AAA – The Auto Club Group 2019. Laminated glass vehicle list. Aaa.com-sivusto. Viitattu 26.8.2025.

<https://www.aaa.com/AAA/common/AAR/files/Laminated-Glass-Vehicle-List.pdf>.

AAA – The Auto Club Group 2024. Emergency car window breaker: Know your vehicle's glass type. Acg.aaa.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025.

<https://www.acg.aaa.com/connect/blogs/4c/auto/car-escape-tool-laminated-window-glass>.

Ahmad, J.; Bazaka, K.; Anderson, L. J.; White, R. D. & Jacob, M. V. 2013. Materials and methods for encapsulation of OPV: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, 104–117.

AlS Windshield Experts 2020. Different Car Windshields in Different Car Models: Check out. Päivitetty 22.5.2025. Windshieldexperts.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.windshieldexperts.com/blog/different-car-windshields-in-different-car-models-check-out/>.

Alibaba 2025. Pvb windshield. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025.

<https://www.alibaba.com/countrysearch/CN/pvb-windshield.html>.

Atiyeh, C. 2019. Some car windows are harder to break in an emergency, says AAA. Caranddriver.com-sivusto. Viitattu 26.8.2025.

<https://www.caranddriver.com/news/a28422725/car-windows-glass-aaa-unbreakable/>.

Autoalan Tiedotuskeskus 2025. Kierrätys. Aut.fi-sivusto. Viitattu 2.8.2025.

<https://aut.fi/markkinatilastot/kierratys/>.

Birkan Engineering 2025. 5 mm clear toughened + 1.52 mm Pvb + 5 mm clear toughened (laminated toughened glass). Birkanengg.co.in-sivusto. Viitattu 3.8.2025. <https://www.birkanengg.co.in/laminated-glass.html>.

Campbell, B. 2023. What are the differences between laminated and tempered glass? Riotglass.com-sivusto. Viitattu. 2.8.2025.

<https://www.riotglass.com/laminated-vs-tempered-glass/>.

Dhaliwal, A. K. & Hay, J. N. 2002. The characterization of polyvinyl butyral by thermal analysis. *Thermochimica Acta*, Vol. 391, No 1–2, 245–255.

ECRIS AB / GCP 2025. Windscreen. Gcp.se-sivusto. Viitattu 3.8.2025.
https://www.gcp.se/en_eur/search?q=Windscreen&mode=text.

Ecological Recycling Complex 2023a. Our know-how developments. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en>.

Ecological Recycling Complex 2023b. Automotive glass recycling triplex. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025.
<https://www.ercglas.com/en/autoglasmaschine>.

Ecological Recycling Complex 2023c. Glass acceptance. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/glasannahme>.

Ecological Recycling Complex 2023d. Broken glass. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/glas>.

Ecological Recycling Complex 2023e. PVB / polyvinylbutyral. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/pvb>.

Ecological Recycling Complex 2023f. Broken glass. Kuva. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/glas>.

Ecological Recycling Complex 2023g. PVB / polyvinylbutyral. Kuva. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 7.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/pvb>.

Ecological Recycling Complex 2023h. PVB / polyvinylbutyral. Kuva. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 7.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/pvb>.

Ecological Recycling Complex 2023i. Ecological program. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.ercglas.com/en/umweltprogramm>.

Ecological Recycling Complex 2023j. Automotive glass recycling triplex. Kuva. Ercglas.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025.
<https://www.ercglas.com/en/autoglasmaschine>.

Euroopan komissio 2024. End-of-Life Vehicles. Environment.ec.europa.eu-sivusto. Viitattu 1.8.2025. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en.

Extrepure Resin (Shanghai) Co., Ltd. 2025. D201 macroporous alkaline ion exchange resin- macroporous resin. Made-in-China.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://extrepureresin.en.made-in-china.com/product/FCixebcwPhVy/China-D201-Macroporous-Alkaline-Ion-Exchange-Resin-Macroporous-Resin.html>.

F.H.Brundle 2025. 11.52mm PVB laminate glass panel per square metre price. Fhbrundle.co.uk-sivusto. Viitattu 3.8.2025. https://www.fhbrundle.co.uk/products/1856115M__11.5mm_PVB_Laminate_Glass_Panel_Per_Square_Metre_price.

Foamit Group 2025. Uusioaines Oy kerää, käsittelee ja kierrättää. Foamit.fi-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://foamit.fi/uusioaines/>.

Glassware Guru 2021. Difference Between Annealed, Tempered, & Laminated Glass. Glasswareguru.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://glasswareguru.com/difference-between-annealed-tempered-laminated-glass/>.

Gomine E Waste Recycling Machine 2024. Car windshield recycling machine, laminated glass PVB film separator machine. Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=gZHSimuEdrQ>.

Gomine E Waste Recycling Machine 2025. Crushing & separating car windshield | Automatic PVB film recycling machine in action! Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=LB07lj4gJ7Y>.

Guangzhou Lingyue Auto Parts Co., Ltd. 2025a. Hot sell good quality front windshield for Toyota Carina 561112b640. Made-in-china.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://lyautoparts.en.made-in-china.com/product/aJlrxQEcTYD/China-Hot-Sell-Good-Quality-Front-Windshield-for-Toyota-Carina-561112b640.html>.

Guangzhou Lingyue Auto Parts Co., Ltd. 2025b. Laminated front windshield for Toyota Allion Premio 4D sedan 2003-. Made-in-china.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://lyautoparts.en.made-in-china.com/product/RmWreVHTqfUj/China-Laminated-Front-Windshield-for-Toyota-Allion-Premio-4D-Sedan-2003-.html>.

Hankkija Oy 2025. Tiesuola (kalsiumkloridi) 1000 kg. Hankkija.fi-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.hankkija.fi/koti-ja-kiinteisto/kiinteistonhoito/hiekoitus-ja-jaan-sulatus/ia-tiesuola-1000-kg-kalsiumkloridi-2002814/>.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025a. High quality waste laminated glass crushing machine glass powder screening production line manufacture. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Waste-Laminated-Glass-Crushing_1601318083574.html.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025b. Professional PVB automobile windshields laminated glass casting film extrusion machinery. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. https://www.alibaba.com/product-detail/Professional-Pvb-Automobile-Windshields-Laminated-Glass_1601261104699.html.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025c. Laminated windshield PVB film separating equipment. Hnhonest.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.hnhonest.com/product/laminated-windshield-pvb-film-separating-equipment/>.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025d. Video. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. https://gv.videocdn.alibaba.com/icbu_vod_video/video_target/gv93-584e60b7-a1ace553-92707862-71ae/trans/dbecd7b6-7d44-4bbf-9d9a-2d21c7918605-h264-hd.mp4?bizCode=icbu_vod_video.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025e. Video. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. https://gv.videocdn.alibaba.com/4f4e1c368ac918af/a3e846151f0cb219/20240417_c258bc8281fa0960_458249645516_mp4_264_hd_unlimit_taobao.mp4.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025f. PVB laminated glass recycling machine: The best way to separation PVB and glass. Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=mVSMfh9o8Ys>.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025g. Kuva. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://s.alicdn.com/@sc04/kf/Hcb4d33af9d1b42e1b6ac5c0d8eb4ec3az.jpg?avif=close&webp=close>.

Henan Honest Heavy Machinery Co., Ltd. 2025h. Kuva. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025.

https://s.alicdn.com/@sc04/kf/Hed2b218b9b0544608d39495e143453c3D.jpg?a_vif=close&webp=close.

Henan Recycle Env Protection Equipment Co., Ltd 2024. How to recycle windshield | PVB laminated glass separator. Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=VixvgM7yCRM>.

Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025a. Car windshield pvb glass crushing machine pvb recovery from shattered windshield. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. https://www.alibaba.com/product-detail/Car-Windshield-PVB-Glass-Crushing-Machine_1601466510228.html.

Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025b. Kuva. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 3.8.2025. https://s.alicdn.com/@sc04/kf/H09876f613fe54f7d81d29b03fc8dfc77q.jpg_720x720q50.jpg.

Henan Recycle Environmental Protection Equipment Co., Ltd. 2025c. Kuva. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 3.8.2025. https://s.alicdn.com/@sc04/kf/H6d831ca258064268bdeac362a778a23e8.jpg_720x720q50.jpg.

Insider Cars 2023. How plastic in shattered windshields is recycled into floor mats | Cars Insider. Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 7.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=Nrgxu7eeAd0>.

Insider Cars 2025. Insider Cars. @InsiderCars-YouTube-kanava. Youtube.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.youtube.com/@InsiderCars>.

Interzero Slovenia 2023. Recycling from 0 to 100%. Interzero.si-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://interzero.si/en/blog/recycling-from-0-to-100/>.

Laxmi Polymers 2019a. Supplier for glass cullet. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 7.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/wp-content/uploads/2021/01/WhatsApp-Image-2019-06-06-at-3.50.41-PM-768x576.jpeg>.

Laxmi Polymers 2019b. Supplier for PVB scrap off grade / recycled plastic. Kuva. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 7.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/wp-content/uploads/2021/01/WhatsApp-Image-2019-06-06-at-8.29.22-PM.jpeg>.

Laxmi Polymers 2021a. Windshield recycling technology. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/windshield-recycling-technology/>.

Laxmi Polymers 2021b. Supplier for glass cullet. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/supplier-for-glass-cullet/>.

Laxmi Polymers 2021c. Product and Services Provided:-. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/product-services-provided/>.

Laxmi Polymers 2021d. Our recycled PVB applications. Windshield-pvb-recycling.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.windshield-pvb-recycling.com/our-recycled-pvb-applications/>.

Made-in-China 2025. Windshield. Made-in-china.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.made-in-china.com/quality-china-product/productSearch?word=windshield>.

Mallick, P. K. 2012. Advanced materials for automotive applications: an overview. Teoksessa Rowe, J. (toim.) Advanced materials in automotive engineering. Cambridge, Yhdistynyt kuningaskunta: Woodhead Publishing Limited (Elsevier), 5–27.

MAVEBA s.r.o 2025a. Sk.maveba.eu-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://sk.maveba.eu/>.

MAVEBA s r.o. 2025b. Maveba spol. s r.o. Facebook.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.facebook.com/carsrecycling>.

Meriaura Oy 2024. Meriaura Asiakastarina: Lasinkierrättäjä Uusioaines Oy – kiertotaloutta nollajätteellä. Blogi. Meriaura.fi-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://meriaura.fi/lasinkierrattaja-uusioaines-oy-kiertotaloutta-nollajatteella/>.

Nanjing Beyou Extrusion Machinery Co., Ltd. 2025a. Pvb automobile windshields laminated glass casting film extrusion machinery production line. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. https://www.alibaba.com/product-detail/Pvb-Automobile-Windshields-Laminated-Glass-Casting_1601171612801.html.

Nanjing Beyou Extrusion Machinery Co., Ltd. 2025b. Pvb automobile windshields laminated glass casting film extrusion machinery production line. Piirustus. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025.
https://www.alibaba.com/product-detail/Pvb-Automobile-Windshields-Laminated-Glass-Casting_1601171612801.html.

National institute of standards and technology 2025a. Composition of polyvinyl butyral:. Nist.gov-sivusto. Viitattu 8.8.2025. <https://pml.nist.gov/cgi-bin/Star/compos.pl?matno=231>.

National institute of standards and technology 2025b. Benzyl butyl phthalate. Webbook.nist.gov-sivusto. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. Viitattu 8.8.2025. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=85-68-7&Units=SI>.

NGA National Glass Association with GANA 2014. Päivitetty 2021. FB40-14 (2021): Recyclability of architectural glass products. Glass technical paper, 1–6. Glass.org-sivusto. Viitattu 4.8.2025.
https://www.glass.org/sites/default/files/2022-03/FB40-14_Recyclability_of_Architectural_Glass_Products.pdf.

Porporato, S.; Darjazi, H.; Gastaldi, M.; Piovano, A.; Perez, A.; Yécora, B.; Fina A.; Meligrana G.; Elia, G. A. & Gerbaldi, C. 2025. On the use of recycled PVB to develop sustainable separators for greener Li-Ion batteries. Advanced sustainable systems, Vol. 9, No 1, 2400569, 1–12.

Qingdao Haocheng Industrial Co., Ltd. 2025. Competitive price 0.76mm blue on green PVB film for windshield glass. Made-in-china.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://qdhaocheng.en.made-in-china.com/product/ldhamokHYAWY/China-Competitive-Price-0-76mm-Blue-on-Green-PVB-Film-for-Windshield-Glass.html>.

Scientific polymer products Inc. 2025. Poly(vinyl butyral). Scipoly.com-sivusto. Viitattu 3.8.2025. <https://scipoly.com/shop/polyvinyl-butyral-9/>.

Sekisui chemical Co., Ltd. 2025. What is PVB interlayer? S-lecfilm.com-sivusto. Viitattu 3.8.2025. <https://www.s-lecfilm.com/en/PVB-interlayer/>.

Sigma-Aldrich 2025. Poly(vinyl butyral-co-vinyl alcohol-co-vinyl acetate). Sigmaaldrich.com-sivusto. Viitattu 3.8.2025.
<https://www.sigmaaldrich.com/FI/en/product/aldrich/182567>.

Simply Glazing Ltd 2025. Glass Prices. Glasswarehouse.co.uk-sivusto. Viitattu 3.8.2025. <https://glasswarehouse.co.uk/glass-prices-2/>.

Skyview Auto Glass 2025. The Science Behind Windshield Laminated Glass: Understanding Durability and Safety. Skyview-autoglass.com-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.skyview-autoglass.com/blog-post17>.

Šooš, L.; Matúš, M.; Pokusová, M.; Čačko, V. & Bábics, J. 2021. The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies. Recycling, Vol. 6, No 2, 26.

Šooš, L.; Pokusová, M.; Blecha, P.; Matúš, M.; Ondruška, J.; Čačko, V. & Bábics, J. 2020a. Method for effective utilization of waste glued glasses and modular constructed device. Patentti SK8786. Omistaja: Slovakian teknillinen yliopisto Bratislavassa. Viitattu 8.8.2025. <https://patents.google.com/patent/SK8786Y1/en?q=SK8786>.

Šooš, L.; Pokusová, M.; Blecha, P.; Matúš, M.; Ondruška, J.; Čačko, V. & Bábics, J. 2020b. Patentti SK8786. Omistaja: Slovakian teknillinen yliopisto Bratislavassa. Viitattu 8.8.2025. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c4/5b/4a/15fee166911f68/SK8786Y1.pdf>.

SUNY Group 2023. PVB laminated glass recycling | Fast way to separate PVB & glass. Viitattu 2.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=bRtCgTBYRU4>.

SUNY Group 2024. Company introduction. Viitattu 2.8.2025. <https://www.sunyrecycle.com/abouts/>.

SUNY Group 2025. How to recycle laminated glass: Windshield & building glass separation machine. Video. Youtube.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. <https://www.youtube.com/watch?v=Scrdx5zNnF4>.

Suomen Autokierrätys Oy 2025. Autokierratys.fi-sivusto. Romutustilastoja. Viitattu 4.8.2025. <https://autokierratys.fi/tietoa-auton-kierratyksesta/romutustilastoja/>.

Suzhou Jwell Machinery Co., Ltd. 2025a. JWELL - Windshield PVB film recycling machine. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025. https://www.alibaba.com/product-detail/JWELL-Windshield-PVB-Film-Recycling-Machine_60769351625.html.

Suzhou Jwell Machinery Co., Ltd. 2025b. JWELL - Windshield PVB film recycling machine. Kuva. Alibaba.com-sivusto. Viitattu 4.8.2025.
https://www.alibaba.com/product-detail/JWELL-Windshield-PVB-Film-Recycling-Machine_60769351625.html.

Swain, B.; Park, J. R. & Lee, C. G. 2022. Industrial recycling of end-of-life vehicle windshield glass by mechanical beneficiation and complete recovery of polyvinyl butyral. *Journal of cleaner production*, Vol. 334, 130192, 1–10.

Swain, B.; Park, J.R.; Shin, D.Y.; Park, K.-S.; Hong, M.H. & Lee, C.G. 2015. Recycling of waste automotive laminated glass and valorization of polyvinyl butyral through mechanochemical separation. *Environmental research*, Vol. 142, 615–623.

Teollisuusliitto ry 2019. Reportaasi: Laitilan Pilkingtonilla tuulilasien valmistus on puhdasta käsityötä. *Tekijalehti.fi*-sivusto. Viitattu 3.8.2025.
<https://tekijalehti.fi/2019/01/17/reportaasi-laitilan-pilkingtonilla-tuulilasien-valmistus-on-puhdasta-kasityota/>.

TRiISO LLC 2015. Tri-iso.com -sivusto. Polyvinyl butyral B-18FG. Viitattu 3.8.2025. https://www.tri-iso.com/documents/Polyvinyl_Butyril_B-08HX_Resin_TDS.pdf.

Tupý, M.; Měřínská, D. & Kašpárková, V. 2012. PVB sheet recycling and degradation. Teoksessa Achilias, Dimitris (toim.) *Material Recycling – Trends and Perspectives*. Rijeka, Kroatia: InTech, 133–150.

Vehmaan PK-Puu Oy 2025. Tiesuola 1000kg Kalsiumkloridi. Pk-puu.fi-sivusto. Viitattu 2.8.2025. <https://www.pk-puu.fi/tuote/tiesuola-1000kg-kalsiumkloridi/>.

Zhang, X.; Hao, H.; Shi, Y. & Cui, J. 2015. The mechanical properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at high strain rates. *Construction and building materials*, Vol. 93, 404–415.