

Ville Kilpiö

Kuitulujitettujen biokomposiittimuovien liimaliitosmenetelmät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinööryö

9.5.2014

Tekijä Otsikko	Ville Kilpiö Kuitulujitettujen biokomposiittimuovien liimaliitosmenetelmät
Sivumäärä Aika	64 sivua + 8 liitettä 9.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Projektipäällikkö Harri Santamala
<p>Tämä opinnäytetyö käsittelee Biofore-konseptiautossa käytetyn biokomposiittimuovien liittämismenetelmiä, keskittyen erityisesti liimaliitoksiin. Opinnäytetyö tehtiin osana Metropolia Ammattikorkeakoulun konseptiautoprojektia, jossa opiskelijapainotteisesti suunniteltiin ja valmistettiin kierrätettäviä materiaaleja käyttäen kaupunkiolosuhteisiin soveltuva konseptiauto. Valmis konseptiauto esiteltiin Geneven kansainvälisessä autonäyttelyssä maaliskuussa 2014.</p> <p>Tutkittavana materiaalina on UPM Formi -biokomposiittimuovi. Tässä työssä tarkastellaan kyseisen muovikomposiitin ominaisuuksia, valmistusmenetelmiä, käyttömahdollisuuksia sekä liittämismenetelmiä, pääpainon ollessa liimaliitoksissa. Työn tavoitteena on löytää helppokäyttöisiä liittämismenetelmiä materiaalille. Pohjatietona käytettiin käytännön kokemuksia ajoneuvon rakennusvaiheelta sekä keskusteluja liima-alan asiantuntijoiden kanssa.</p> <p>Erilaisten liittämismenetelmien lujuusominaisuuksia materiaalin eri variaatioihin tutkittiin ISO-standardia 4587 mukailleen. Tuloksena saatiin suhteellisen yhteneväistä ja luotettavaa tietoa saavutetusta liitoksen lujuudesta. Työn tavoitteet saavutettiin, sillä tutkittavan biokomposiittimuovien liittämiseen löytyi helppokäyttöisiä ratkaisuja eri lujuusluokan liitoksiin. Tutkimusten tulosten perusteella pystyttiin lisäksi arvioimaan lujitekuitupitoisuuden vaikutusta biokomposiittimuovien liittämismominaisuuksiin. Tuloksia voidaan käyttää apuna liitosmenetelmien valitsemisessa kyseiselle biokomposiittimuoville.</p> <p>Käytännön tutkimusten lisäksi opinnäytetyö sisältää kattavan teoriaosuuden kuitulujitetuista muovikomposiiteista, liimaliitosmenetelmistä sekä liimaliitoksen kestävyyttä ja erityisesti tartuntaa selittävästä adheesiot teoriasta. Työtä voidaankin käyttää apuna erityisesti suunniteltaessa polyolefiinipohjaisten muovien liimaliitoksia.</p>	
Avainsanat	UPM Formi, biokomposiittimuovi, adheesio, ultraäänihitsaus, Biofore

Author Title Number of Pages Date	<p>Ville Kilpiö Adhesive Bonding Methods of Fiber Reinforced Biocomposite Plastics 64 pages + 8 appendices 9 May 2014</p>
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Harri Santamala, Project Manager
<p>This Bachelor's thesis discusses bonding methods of fiber reinforced biocomposite plastics used in the Biofore Concept Car. The main focus is on adhesive joints. This thesis was carried out as a part of the concept car project of Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, in which an urban concept car was engineered and manufactured by students with help of the school personnel. One of the main focuses in this project was to use environmental friendly and renewable biomaterials. The car was introduced at the Geneva International Motor Show in spring 2014.</p> <p>The material researched in this thesis is UPM Formi biocomposite plastic. This thesis describes properties, manufacturing methods, accessibilities and bonding methods of this composite plastic, the main focus being on adhesive bonding. The objective of this thesis is to find easy-to-use bonding methods for the composite plastic. Hands-on experience during the manufacturing period of the concept car and conversations with experts of bonding industry were used as background information in this thesis.</p> <p>The strengths of joints achieved with different bonding methods were investigated very similarly as in ISO 4587 standard. The results of these tests were relatively consistent and reliable. The objectives were achieved, because user-friendly bonding methods for the composite plastic were found for the joints of different strengths. Also the influence of reinforcement fiber content on the bonding properties can be estimated based on the results of the tests. The results can be used in order to choose bonding methods for this composite plastic.</p> <p>Besides practical research this thesis also includes an encompassing theory part which discusses fiber reinforced biocomposite plastics, adhesive bonding methods and especially -adhesion theory, which explains the properties of adhesive bond. This thesis can be utilized in design of adhesive joints, especially with polyolefin based plastics.</p>	
Keywords	UPM Formi, biocomposite plastic, adhesion, ultrasonic welding, Biofore

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Biofore-konseptiautoprojekti	1
1.2	Tavoite	2
2	Kuitulujitettu biokomposiittimuovi	3
2.1	UPM Formi	3
2.2	Kestomuovikomposiitti	5
2.3	Matriisimuovi	7
2.3.1	Polypropeeni	7
2.3.2	Polyeteeni	10
2.4	Lujitekuitu	12
2.5	Täyte- ja apuaineet	13
2.6	Granulaatit	13
2.7	Valmistusmenetelmät	14
2.7.1	Ruiskuvalu	15
2.7.2	Ekstruusio	18
2.8	UPM Formin käyttökohteita Biofore-konseptiautossa	19
3	Liitosmenetelmät	20
3.1	Liimaaliitokset	21
3.1.1	Liimaliitoksen rasitukset ja kestävyys	22
3.1.2	Liitoksen kuormitus laskennallisesti	27
3.1.3	Adheesioteoria	30
3.2	Polyolefiinien liittäminen	33
3.2.1	Liimat	34
3.2.2	Liimakalvot	36
3.2.3	Kuumaliima	38
3.3	Ultraäänihitsaus	39
3.3.1	Ultraäänihitsauslaitteisto ja prosessiparametrit	40
3.3.2	Hitsattavan materiaalin ominaisuuksien vaikutus	41
3.3.3	Ultraäänihitsausprosessi ja hitsattava kappale	43
4	Liimausprosessi	45
4.1	Liimaliitoksen suunnitteluperusteet	45

4.2	Liimapintojen esikäsittely	46
4.3	Liimaus ja liima-aineen kovettuminen	48
5	Liimaliitosten testimenettelyt	48
5.1	Testikappaleiden valmistus	49
5.2	Testikappaleiden liimaus	50
5.3	Veto-leikkauslujuuskokeet	51
5.4	Tulokset	54
5.5	Mikroskooppitarkastelut	57
5.6	Johtopäätökset	58
6	Yhteenveto	60
	Lähteet	62
	Liitteet	
	Liite 1. Liimausohje	
	Liite 2. 3M DP-8005 -liiman tekniset tiedot	
	Liite 3. Loctite 3038 -liiman tekniset tiedot	
	Liite 4. Loctite 4090 -liiman tekniset tiedot	
	Liite 5. 3M 9088 -liimakalvon tekniset tiedot	
	Liite 6. AFTC 6406LSE -liimakalvon tekniset tiedot	
	Liite 7. 3M 3731 -kuumaliiman tekniset tiedot	
	Liite 8. Veto-leikkauslujuuskokeiden keskimääräiset tulokset ja vaihteluvälit sarjoittain	

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Metropolia Ammattikorkeakoulun Biofore-konseptiautoprojektia. Opinnäytetyön aiheena on konseptiautossa käytettyjen muovikomposiittiosien liittämismenetelmien tutkiminen. Aihetta on käsitelty teoriapohjaisesti sekä käytännön koejärjestelyillä.

Vaikka muovi materiaalina ei ole autoteollisuudessa uusi ratkaisu, on sen käyttöaste noussut huomattavasti viime vuosikymmeninä. Sen käyttökohteita on niin sisä- kuin ulkopuolen osissa. Muovin suosioon materiaalina on vaikuttanut mm. sen muokattavuus, laajat valmistusmahdollisuudet sekä pyrkimys painonsäästöön. Muovin ominaisuuksiin voidaan sen valmistusvaiheessa vaikuttaa laajasti, jolloin lopputuotteelta saadaan halutut ominaisuudet. Yleistä on myös muovituotteiden lujuusominaisuuksien parantaminen erilaisilla lujitekuiduilla. Tässä opinnäytetyössä keskitytään selluloosakuitulujitteiseen muovikomposiittiin. Selluloosakuiduilla pyritään muovituotteissa vielä suurempaan kierrätettävyysasteeseen ja täten ympäristöystävällisempään tuotteeseen.

1.1 Biofore-konseptiautoprojekti

Konseptiautoprojektin kaksi pääteemaa ovat olleet suomalaisen insinööriosaamisen havainnollistaminen sekä suomalaisvalmisteisten ympäristöystävällisten materiaalien käyttö ajoneuvossa. Vuonna 2010 alkaneen projektin tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa kestävä kehityksen kaupunkiauto opiskelijapainotteisesti henkilökunnan ohjauksessa. Ajoneuvo (kuvassa 1) on tarkoitus rekisteröidä tieliikennekelpoiseksi. Hankkeessa työskenteli yhteensä noin 70 eri alojen opiskelijaa sekä henkilökunnan jäsentä.



Kuva 1. Biofore-konseptiauto

Ajoneuvossa käytettyjä kotimaisen valmistajan uusiutuvia biomateriaaleja ovat UPM Grada ja Formi. UPM Grada on lämpömuovattavaa vaneria ja Formi puolestaan kuitulujitettua muovikomposiittia. Siitä on valmistettu ajoneuvon ulko- ja sisustan osia.

1.2 Tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia projektissa käytetyn biokomposiittimuovin liittämismahdollisuuksia. Ongelmia näissä tuottaa polyolefiinipohjainen matriisimuovi, jonka liimaliitokset ovat yleisesti hankalia materiaalin matalan pintaenergian takia.

Työn teoriaosuudessa kuvataan, mistä komponenteista kyseinen biokomposiittimuovi koostuu, sen valmistusmenetelmiä sekä sen käyttökohteita Biofore-konseptiautoprojektissa. Biokomposiittimateriaali käydään läpi pääpiirteittäin, mutta sen tarkka koostumus on liikesalaisuus. Lisäksi kerrotaan liimauksesta menetelmänä yleisesti, erilaisista liimausvaihtoehdoista ja liimaliitoksen suunnitteluperusteista. Teoriaosuudessa perehdytään myös adheesioilmiöön, johon liima-aineen tartunta perustuu. Myös polyolefiinien liimaamiseen soveltuva liimausohje löytyy liitteestä 1.

Liittämismenetelmien valinnassa on käytetty perusteena konseptiautoprojektin rakennusvaiheessa tehtyjen käytännön testien lisäksi syksyllä 2013 Stuttgartissa järjestetyillä kansainvälisillä liittämismessuilla Bond Expossa käytyjä keskusteluja liima-aineiden valmistajien kanssa sekä biokomposiittimuovin valmistajan toiveita. Tavoitteena oli löytää helppokäyttöisiä ja nopeita liittämiskäytöksiä, jotka eivät vaadi monimutkaisia liitettävien pintojen esikäsittelyjä. Erilaisten liimaliitosratkaisujen lisäksi tarkastellaan materiaalin ultraäänihitsausmahdollisuuksia.

Tässä opinnäytetyössä suoritetaan myös käytännön testejä eri liima-aineille. Käytännön osuuden tarkoituksena on tutkia nimenomaan adheesiota eli liima-aineen tarttuvuutta biokomposiittimuoviin. Tätä ilmiötä tutkitaan liima-aineen veto-leikkauslujuustestillä standardia ISO 4587 mukaisesti. Saatujen tulosten perusteella tehdään johtopäätöksiä liima-aineen tarttuvuudesta kyseiseen biokomposiittimateriaaliin ja näin saavutetusta veto-leikkauslujuudesta. Tuloksissa vertaillaan myös eroavaisuuksia materiaalin eri selluloosakuitupitoisuuksien välillä.

2 Kuitulujitettu biokomposiittimuovi

2.1 UPM Formi

UPM Formi on komposiittigranulaattia. Siinä matriisimuovina toimivaan polypropeeniin on lisätty selluloosakuituja. Kuidut sekä vahvistavat että jäykistävät muovikomposiittia. Tuotteen matriisimuovi on kestävä, joten tuotteen kierrätettävyyssaste on jo sinällään korkea. Lujitekuituina käytetyt selluloosakuidut ovat myös uusiutuvia, millä on myös tuotteen hiilijalanjälkeä pienentävä vaikutus.

Tuote soveltuu erityisesti ruiskuvalutuotantoon. Tuotetta valmistetaan kolmea eri laatua:

- UPM Formi GP yleiskäyttöön
- UPM Formi SP erikoispinnoille
- UPM Formi EFP ohutseinäisille sovelluksille. [1]

Tämän insinööriyön kannalta näistä oleellisin on yleiskäyttöön soveltuva UPM Formi GP. Tuotetta on saatavilla eri selluloosapitoisuuksilla. Selluloosapitoisuuden vaikutuksia tuotteen ominaisuuksiin on listattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. UPM Formi GP:n mekaaniset ja fyysiset ominaisuudet [2]

Property	Test method	GP 20	GP 30	GP 40	GP 50
Density, g/cm ³	ISO 1183	0,99	1,03	1,08	1,13
Tensile strength, 50mm/min, N/mm ²	ISO 527-2	33	43	53	57
Tensile modulus, 1mm/min, N/mm ²	ISO 527-2	2100	3100	3800	5000
Elongation at break, 50mm/min, %	ISO 527-2	6,2	5,5	5,2	4,0
Charpy impact strength, notched +23 °C, kJ/m ²	ISO 179/1eA	6,0	6,7	7,7	7,5
Charpy impact strength, unnotched+23 °C, kJ/m ²	ISO 179/1eU	34	37	42	39
Cellulose content, weight %		20	30	40	50

Taulukon 1 mukaan nähdään selluloosapitoisuuden (cellulose content) nostavan tuotteen tiheyttä (density). Vetolujuus (tensile strength) on se vetojännitys aksiaalisessa jännitystilassa, joka aiheuttaa materiaalin pettämisen. Vetomoduuli (tensile modulus) on materiaaliyhdistelmän kimmomoduuli vedossa. Taulukon mukaan molemmat kasvavat selluloosapitoisuuden kasvaessa. Prosentuaalinen venymä (elongation at break) kuvaa materiaalin kykyä vastustaa muodonmuutoksia rikkoutumatta. Se on vedossa pidentyneen kappaleen pituuden suhde kappaleen alkuperäiseen pituuteen. Iskulujuus (charpy impact strength) kuvaa materiaalin kykyä absorboida iskuenergiaa rikkoutumatta. Se on iskun absorboimiskyvyn suhde poikkileikkaukseen nähden. Testissä testikappale voi olla myös lovitettu (notched). Taulukossa on esitetty myös testeissä käytetyt standardit. [3; 4; 5, s. 543.]

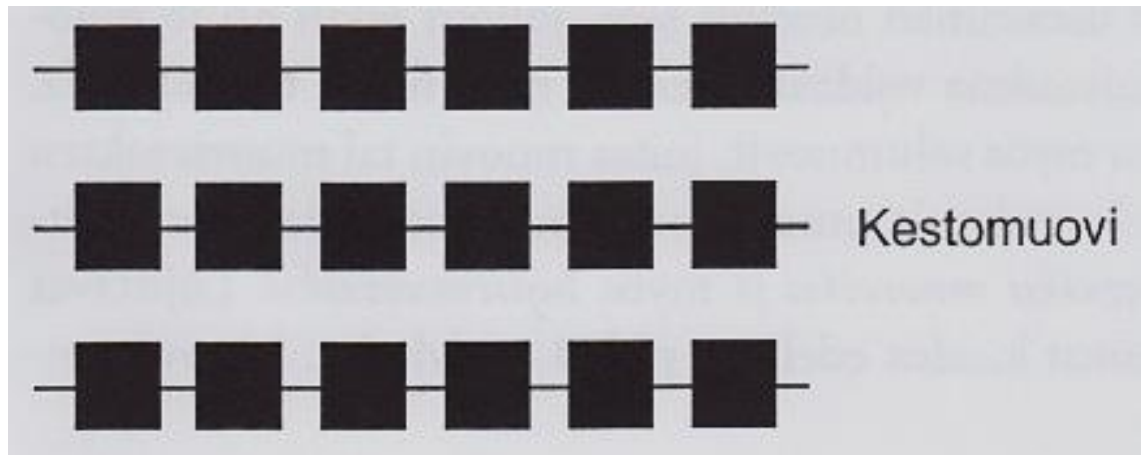
2.2 Kestomuovikomposiitti

Yleisesti termi komposiitti tarkoittaa materiaaliyhdistelmää. Komposiittimateriaalin ominaisuudet ovat paremmat kuin materiaaleilla, joista se koostuu. Vaikka komposiitti koostuu useammasta materiaalista, sen sisältämät materiaalit eivät kuitenkaan ole liuenneet tai sulautuneet toisiinsa. Lähes aina komposiittimateriaalissa on sidosaine, jota kutsutaan matriisiksi. Sen tehtävä on sitoa materiaalit yhteen. Matriisi sitoo yhteen esimerkiksi erilaisia partikkeleita tai ohuita kuituja.

Muovikomposiitissa muoviaine toimii matriisina. Matriisimuovin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa laajasti erilaisilla täyte- ja apuaineilla. Lujuusominaisuuksien parantamiseksi muovikomposiitissa voidaan käyttää lujitekuituja. Tällainen materiaaliyhdistelmä on kuitulujitettu muovikomposiitti. Käytössä on sekä jatkuvia että katkokuituja. [6, s. 17.]

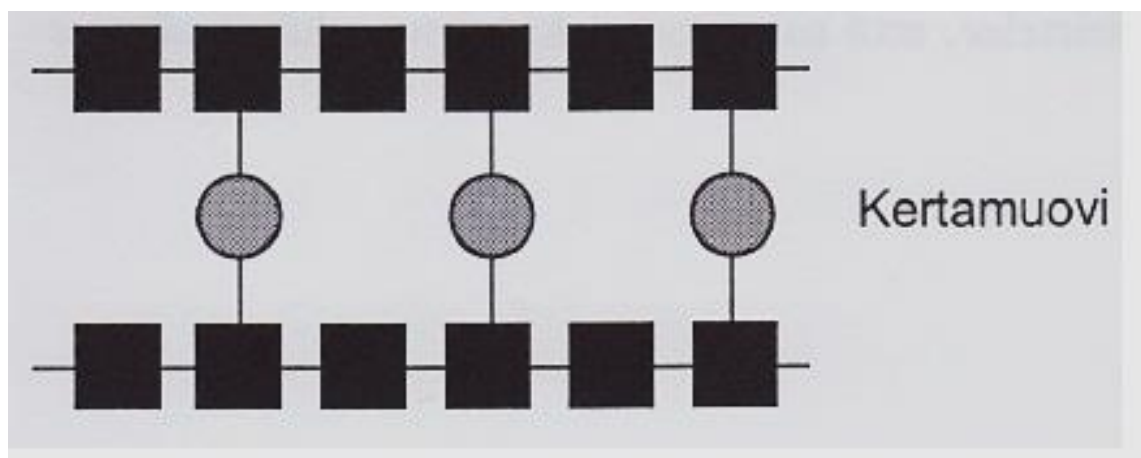
Muovit koostuvat suurimolekyylisistä polymeereistä. Ne sisältävät usein lisäaineita tiettyjen ominaisuuksien parantamiseksi. Erilaisia lisäaineita ja niiden käytöllä saavutettavia ominaisuuksia käsitellään luvussa 2.5. Muovit ovat joko kesto- tai kertamuoveja. Jako eri ryhmiin määräytyy muokattavuusominaisuuksien perusteella. [6, s. 18.]

Kestomuovit ovat näistä kahdesta suurempi ryhmä, ja myös tämän insinööriyön kannalta oleellisempi. Kestomuovien rakenne on esitetty kuvassa 2. Molekyylit muodostavat pitkiä polymeeriketjuja ja näiden ketjujen välillä ei ole kemiallisia sidoksia. Kestomuoveista käytetään myös nimitystä termoplastinen muovi, niiden uudelleenmuovausominaisuuksien takia. Muokkaus tapahtuu lämmön ja paineen vaikutuksesta. Lämpö heikentää molekyyliä yhdessä pitäviä voimia, ja vastaavasti muovin jäähtyessä molekyylien väliset voimat vahvistuvat. Tämä mahdollistaa kestomuovien uudelleenmuovaamisen. Yleisiä kestomuoveja ovat polypropeeni ja polyeteeni. [6, s. 18, s. 53.]



Kuva 2. Kestomuovin rakenne [6, s. 18]

Toisen pääryhmän muodostavat kertamuovit, jotka syntyvät kemiallisessa kovettumisreaktiossa. Kertamuoveissa perusraaka-aineena toimii hartsit. Toisin kuin kestopuoveissa, kertamuovien polymeeriketjut ovat kytkeytyneet toisiinsa kemiallisin sidoksin kuvan 3 mukaisesti. Tätä kutsutaan myös silloittuneeksi tai verkottuneeksi rakenteeksi. [6, s. 18.]

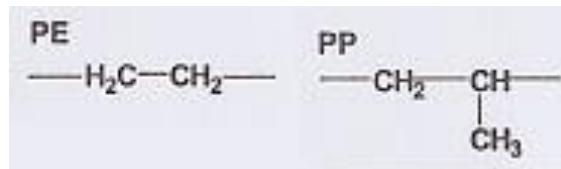


Kuva 3. Kertamuovin rakenne [6, s. 18]

Hartseja on useita erilaisia ja niiden kovettumisreaktiot eroavat myös toisistaan. Kovettuakseen hartsit tarvitsevat ulkoista energiaa, esimerkiksi lämpöä. Jotkut hartsit tarvitsevat erillisen kovetteen reaktion alulle laittamiseksi. Kovettumisreaktion seurauksena muodostuu silloittunut rakenne, joka ei ole enää uudelleen muokattavissa. Yleisiä kertamuoveja ovat epoksit, tyydyttymättömät polyesterit ja fenolit. [6, s. 19.]

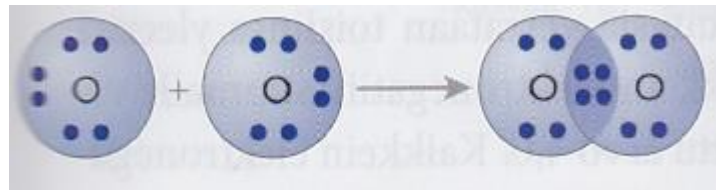
2.3 Matriisimuovi

Tässä opinnäytetyössä tutkittavan materiaalin matriisimuoveja ovat polypropeeni ja polyeteeni. Molemmat kuuluvat polyolefiinien ryhmään. Olefiinit ovat haaroittuneita tai lineaarisia hiilivetyjä. [7, s. 163.] Kuvassa 4 on esitetty polyeteenin lineaarinen ja polypropeenin haaroittunut rakenne.



Kuva 4. Polyeteenin ja polypropeenin rakenteet [7, s. 162]

Olefiinien hiilivetyketjussa on lisäksi ainakin yksi kaksoissidos. Kaksoissidoksessa molekyylin kaksi atomia jakavat keskenään kaksi elektroniparia. [8, s. 23.] Kuvassa 5 on esimerkki happimolekyylin kaksoissidoksesta.



Kuva 5. Happimolekyylin kaksoissidos [8, s. 23]

Polyolefiinien valmistuksen perusraaka-aine on teollisuusbensiini. Se on öljynjalostuksessa muodostuva tuote. Käsittelemällä teollisuusbensiiniä tietyllä tavalla se saadaan hajotettua pienemmiksi molekyyleiksi. Tällä tavalla saadaan esimerkiksi eteeniä ja propeenaa, joita edelleen polymeroimalla voidaan taas valmistaa polyeteeniä ja polypropeenaa. Polymerointi on kemiallinen reaktio, jossa yksittäiset molekyylit liittyvät toisiinsa muodostaen molekyyliketjun. [7, s. 163–164.]

2.3.1 Polypropeeni

Polypropeeni (PP) on yksi yleisimmistä muovilaaduista. Kemialliselta koostumukseltaan se on puhdas hiilivety. Polypropeenaa valmistetaan matalassa paineessa polymeroimalla propeenaa. Polymeroitumisreaktio käynnistetään katalyytin

avulla. Katalyytti nopeuttaa kemiallisen reaktion etenemistä. Se voi myös saada reaktion tapahtumaan alhaisemmassa lämpötilassa kuin reaktio normaalisti tapahtuisi. Propeenin polymeroitumisreaktiossa voidaan käyttää katalyyttinä joko metalloseeniä, joka on metallin ja hiilen yhdiste, tai Ziegler-Natta -katalyyttiä, joka taas on titaani- tai alumiiniyhdiste. Näitä katalyyttejä käytettäessä polymerointireaktiossa muodostuva polymeeri on rakenteeltaan säännöllinen. [6, s. 53; 9; 10.]

Polypropeenin ominaisuuksia on mahdollista muokata hyvin laajasti. Ominaisuuksiin vaikuttavat polymeerirakenne sekä lisäaineet, ja näihin vaikuttamalla on muovilaadusta mahdollista saada käyttötarkoitukseen sopiva. [6, s. 53.] Taulukkoon 2 on listattu polypropeenin ominaisuuksia.

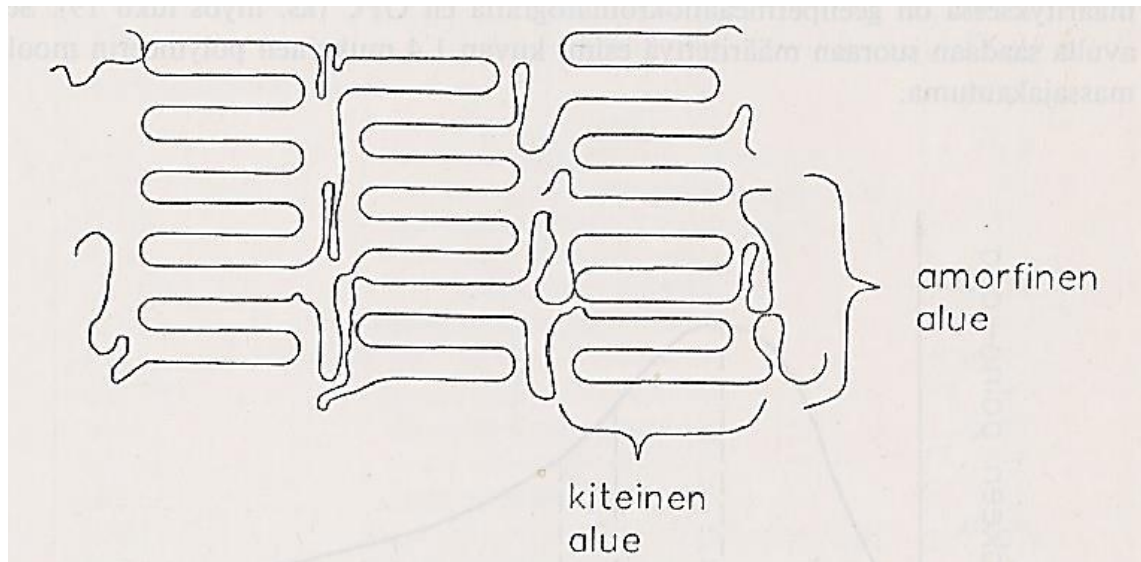
Taulukko 2. Polypropeenin ominaisuuksia [6, s. 54]

Kiteisyysaste	40–60 % ¹
Lasittumislämpötila	-20– -10 °C
Sulamislämpötila	160–175 °C
Korkein jatkuva käyttölämpötila	100 °C
Korkein lyhytaikainen käyttölämpötila	130 °C
Vetokimmomoduli	0,6–1 GPa ²

Kiteisyysaste kertoo polymeerin sisäisen rakenteen kiteisten alueiden prosentuaalisen osuuden. Järjestäytyneitä kiteisiä alueita kutsutaan kristalliiteiksi. Näiden alueiden välissä on kuvan 6 mukaisesti satunnaisesti järjestäytyneitä eli amorfisia alueita. Kiteisyysasteella on vaikutusta kappaleen veto- ja murtolujuusominaisuuksiin, koska kappaleen kiteiset alueet suuntautuvat ulkoisen voiman mukaisesti. Näin ne voivat esimerkiksi vahvistaa vetolujuutta vetävän voiman suuntaisesti, mutta toisaalta tällöin vetolujuus voimaa vasten kohtisuorassa suunnassa heikentyy. [5, s. 26–27.]

¹ Nostettavissa 70 %:iin lämpökäsittelyllä.

² Lujitettuna jopa 9 GPa.



Kuva 6. Osakiteinen polymeeri [5, s. 27]

Lasittumislämpötila, eli lasipiste, on se lämpötila, jossa polymeerin mekaaniset ominaisuudet ja viskositeetti muuttuvat merkittävästi. Kiteisten polymeerien tapauksessa, lasiutumislämpötilan alapuolella materiaalin rakenteen amorfisten osien polymeeriketjut eivät pääse liikkumaan, joten materiaali on kova ja hauras. Lasiutumislämpötilan yläpuolella taas polymeeriketjujen liike on mahdollista. Polymeeriketjujen liike tekee materiaalista osittain joustavaa kiteisten polymeerien tapauksessa. Lasittumislämpötilasta käytetään myös nimityksiä lasiutumislämpötila ja lasisiirtymälämpötila. [7, s. 59.]

Sulamislämpötila on lämpötila-alue, jonka yläpuolella kiteiset alueet alkavat muuttua amorfiseksi, eli järjestäytynyt sisäinen rakenne järjestäytymättömäksi. Molekyylin rakenne kuitenkin säilyy, eli ne eivät katkeile. Korkein jatkuva ja lyhytaikainen lämpötila määrittelevät polypropeenin käyttökohteet. [7, s. 58.]

Vetokimmomoduli kuvaa materiaalin vetojännityksen ja venymän suhdetta. Se voidaan määrittää kokeellisesti tai laskea Hooken lain avulla:

$$\sigma = E * \epsilon$$

jossa σ on vetojännitys (MPa), E on kimmomoduli (MPa) ja ϵ on voiman aiheuttama suhteellinen venymä $\Delta L/L$. Hooken laki pätee vain lineaarisella ja kimmoisalla alueella,

veto- tai puristuskuormituksen vaikuttaessa yksiakiaalisesti. Materiaali on lineaarisesti kimmoisa, jos vetojännityksen aiheuttamat muodonmuutokset kasvavat lineaarisesti sekä palautuvat vetojännitys poistettaessa. [5, s. 306.]

2.3.2 Polyeteeni

Polyeteeni (PE) on myös hyvin yleisesti käytettävä muovi. Polyeteenin valmistusmenetelmänä käytetään eteenin polymerointia. Polyeteeniä on olemassa useita eri laatuja ja ne voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan tiheydensä perusteella:

- pienitiheyspolyeteeni LDPE
- keskitiheyspolyeteeni MDPE
- suuritiheyspolyeteeni HDPE.

Tämän lisäksi polyeteenit voidaan jakaa ryhmiin myös valmistusmenetelmän ja ominaisuuksiensa mukaan, joista esimerkkeinä taulukossa 3 olevat VLD (hyvin pienen tiheyden polyeteeni) ja LLD (lineaarinen pientiheyspolyeteeni). [5, s. 33; 11.]

Kemialliselta rakenteeltaan polyeteeni on hyvin yksinkertainen, kaksi hiileen sitoutunutta vetymolekyyliä muodostavat hiiliketjun. Polyeteenin laatuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat valmistusmenetelmä ja -olosuhteet. Eri polymerointimenetelmillä vaikutetaan muun muassa polymeerin moolimassaan, tiheyteen, rakenteeseen ja kiteisyyteen. [11]

Ominaisuuksista kiteisyydellä on suora vaikutus tiheyteen. Tiheydellä puolestaan on suuri merkitys polyeteenin fysikaalisten ja mekaanisten ominaisuuksien kannalta. Polyeteenissä suuri tiheys kasvattaa materiaalin myötörajaa, kimmomoduulia sekä lämmönkestoa ja näin ollen vaikuttaa myös sulamislämpötilaan. Toisaalta suuri tiheys myös laskee liukoisuutta ja iskulujuutta. [11]

Polymeerin moolimassa puolestaan vaikuttaa polyeteenin viskositeettiominaisuuksiin. Matala moolimassa nostaa sulaviskositeettiä ja päinvastaisesti korkea moolimassa laskee sulaviskositeettiä. Sulaviskositeetti vaikuttaa polyeteenin iskulujuuteen, myötörajaan ja kimmomoduliin. [11]

Valmistustekniseltä kannalta moolimassajakaumalla on suuri merkitys. Kapean moolimassajakauman omaavat laadut sopivat hyvin ruiskuvalettaviksi, kun taas leveän moolimassajakauman laadut on mahdollista valmistaa ekstruusiomenetelmällä. [11]

Taulukossa 3 on vertailtu eri polyeteenilaatujen ominaisuuksia keskenään.

Taulukko 3. Eri polyeteenilaatujen ominaisuuksia [5, s. 34]

Ominaisuus	VLD	LD	LLD	HD
tiheys (g/cm ³)	0,905	0,92	0,93	0,95
sulaindeksi (2,16 kg/190 °C)	5,4	6,7	4,4	
sulamislämpötila (°C)	118	107	125	133
kiteisyysaste (%)	17	28	45	60-90
moolimassa (10 ³ g/mol)	77	160	80	
vetolujuus (MPa)		~20	25–35	21–38

Taulukko kuvastaa hyvin edellä esitettyjä ominaisuuksien vaikutusta toisiinsa. Taulukon mukaan kiteisyysasteen kasvaessa myös tiheys kasvaa. Tämä nostaa myös vetolujuutta sekä sulamislämpötilaa.

Sulaindeksin eli sulaviskositeetin (käytetään myös nimitystä sulamassavirta) määrittämiseksi on standardoitu testi (ASTM D 1238 ja ISO 1133). Testin tulosten perusteella määritellään muoviraaka-aineen moolimassan suuruusluokka ja näin myös muovausominaisuudet sekä lujuusominaisuudet. [5, s. 467; 7, s. 95.]

Testissä muoviraaka-aine on joko jauheena tai granulaatteina, ja se lämmitetään standardissa määrättyyn lämpötilaan. Eri muoveille on määritelty eri testauslämpötilat; yllä olevassa taulukossa sulamassavirta on määritetty käyttäen lämpötilaa 190 °C. Sulatilassa olevaan aineeseen kohdistetaan männän painon vaikutus. Männän painolle on myös olemassa eri arvoja riippuen tutkittavasta muovimateriaalista, ja yllä olevan taulukon arvojen saamiseksi on käytetty 2,160 kilogramman painoa. Sulamassavirta on 10 minuutin aikana ulos valunut määrä sulaa muovia grammoina. Pieni sulamassavirta tarkoittaa, että sula on jäykkää, jolloin polymeerimolekyylit ovat suurikokoisia. [7, s. 96.]

2.4 Lujitekuitu

Lujitekuidut ovat matriisimuovin seassa olevia kuituja. Niitä käytetään muovin mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi. Kuitulujitetussa komposiittimuovissa lujitekuidut kantavat materiaalia rasittavat kuormitukset. Matriisimuovi taas yhdistää ja suojaa kuituja sekä välittää ulkoiset kuormitukset kuiduille. Joillakin täyte- ja lisäaineilla voi olla myös lujuusominaisuuksia parantavia vaikutuksia, mutta niitä ei silti lueta varsinaisiksi lujitteiksi. Yleisimmin lujitekuituina käytetään lasi-, hiili- ja aramidikuituja. [6, s. 74.]

Erityisesti autoteollisuuden käytössä on yleistymässä jälleen luonnonkuitujen käyttö lujitteina. Luonnonkuitujen käytön etuna on suuri tuotteiden kierrätettävyysaste. Tuotteiden loppuhävitys ei myöskään rasita ympäristöä. Ajoneuvovalmistajat ovat valmistaneet luonnonkuituvahvistetuista materiaaleista monia sisustan osia, kuten hansikaslokeroja, ovipaneeleita ja takaluukun sisäpaneeleita. Käyttökohteita kehitetään myös ulkopuolisiin osiin. Eri luonnonkuituvaihtoehtoja ovat muun muassa eläinkarvat, kasvikuidut sekä puukuidut. Tämän insinööriyön kannalta oleellisimpia ovat selluloosapohjaiset kuidut, joita käytetään tässä työssä tutkittavana olevan materiaalin lujitteina. Näitä kuituja valmistetaan puusta prosessoimalla. [6, s. 99; 12, s. 283.]

Selluloosa on pitkäketjuinen haaroittumaton polymeeri. Selluloosamolekyylit ovat lineaarisia ja ne muodostavat molekyylin sisäisiä ja välisiä vetysidoksia. Tällöin vierekkäiset molekyylit muodostavat kiteisiä molekyylimppuja eli mikrofibrillejä. Mikro fibrilleistä taas muodostuu perusfibrillejä ja näistä edelleen selluloosakuituja. Selluloosan tiiviin rakenteen ja lukuisten vetysidosten ansiosta sillä on suuri vetolujuus eikä se liukene suurimpaan osaan liuottimista. [13, s. 352; 14.]

Selluloosakuituja saadaan esimerkiksi puuteollisuuden jättemateriaalista prosessoimalla. Ne lisätään matriisimuoviin muovin valmistusprosessin yhteydessä. Käyttämällä selluloosakuituja saavutetaan etuja esimerkiksi valmistuskustannuksissa, ympäristöystävällisyydessä sekä painonsäästöissä. Esimerkiksi lasikuituun verrattuna on selluloosakuitu kevyempää pienemmän tiheydensä ansiosta. [13, s. 242, s. 251–252.]

Haittapuolina selluloosakuitujen käytössä ovat niiden lämmönkesto-ominaisuudet, matriisimuovin ja lujitekuidun välinen vuorovaikutus sekä kuitujen laadun vaihtelevuus.

Alhaisen lämmönkeston vuoksi selluloosakuituja käytetään usein polypropeenin ja polyeteenin yhteydessä, koska myös näiden muovien lämmönkesto on alhainen. Kuitulujitettu muovikomposiitti saattaa vaatia erityistä käsittelyä, jotta matriisimuovin ja lujitekuidun välinen vuorovaikutus olisi toimiva, eli voimat siirtyisivät matriisimuovin kautta lujitekuituihin. Selluloosakuiduissa saattaa esiintyä myös kuitujen solujen seinämissä olevia vikoja, jotka voivat olla syynä osan alhaiseen rakenteelliseen lujuuteen. [12, s. 292–293; 13, s. 243, s. 253.]

2.5 Täyte- ja apuaineet

Muoveihin on mahdollista sekoittaa erilaisia täyteaineita haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Niillä voidaan vaikuttaa muovin mekaanisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin. Täyteaineet muuttavat muovin jäykkyyttä, tiheyttä sekä viskositeettiä. Niitä on mahdollista käyttää myös lujitekuitujen yhteydessä. [6, s. 57–58.]

Muovituotteiden värjäämiseksi käytetään väriaineita ja pigmenttejä. Niitä käytetään yleensä pieniä määriä, joten niillä ei ole varsinaista merkitystä muovituotteen mekaanisten ominaisuuksien kannalta. Orgaanisia värejä käytettäessä väriaine liuotetaan aluksi sopivaan liuotteeseen. Tämä väriliuote liuotetaan sen jälkeen värjättävään muoviin. Yleisempi tapa värjätä muoveja on pigmenttien käyttö. Pigmenttejä on saatavissa muoviin ennen prosessointia sekoitettavana pulverina, pastoina eli nesteväreinä tai väritiivisteinä. Näistä yleisin on muoviin sekoitettava väritiiviste eli masterbatch. [6, s. 70.]

2.6 Granulaatit

Granulaatit ovat kestumuovirakeita, joita käytetään esimerkiksi ruiskuvaluprosessin raaka-aineina. Ne voivat sisältää täyteaineita ja lujitekuituja. Tavallisesti lujitekuituina käytetään hiili- tai lasikuituja. Tässä insinööriyössä käytössä oleva materiaali sisältää luonnonkuitulujitteita. Kuvassa 7 on selluloosakuitulujitettuja UPM Formi-granulaatteja. [6, s. 148.]



Kuva 7. UPM Formi-granulaatteja [15]

Lujitekuituina voidaan käyttää niin pitkiä kuin lyhyitä kuituja. Yleisesti yli 10 mm:n pituiset kuidut lasketaan pitkeiksi kuiduiksi. Pitkien kuitujen käyttö on kuitenkin ongelmallista ruiskuvaluprosessin yhteydessä, koska kuidut pilkkoutuvat siinä. Näin ollen pitkien kuitujen käytöstä tämän valmistusprosessin yhteydessä ei ole varsinaista hyötyä. Kestomuovirakeiden valmistamisessa on kaksi erityyppistä vaihtoehtoa. Jos lujitekuituna käytetään jatkuvaa kuitua, on mahdollista käyttää kaapelipäälylystysmenetelmää, jossa jatkuva lujitekuitu päälylytetään sulalla muovilla. Yleisemmin käytössä on luvussa 2.7.2 esiteltävä ekstruuderimenetelmä, jossa ekstruuderilla mahdolliset täyteaineet, sekä jatko- tai katkokuidut seostetaan suoraan sulatilassa olevaan muoviin. [6, s. 148–149.]

2.7 Valmistusmenetelmät

Ruiskuvalu- ja ekstruusiomenetelmä ovat yleisiä kestomuovikappaleiden valmistusmenetelmiä. Niitä käytetään myös valmistettaessa tuotteita UPM Formi-granulaateista. Molemmissa menetelmissä pääperiaate on muoviraaka-aineen

kuumentaminen pehmeäksi massaksi, jonka jälkeen se työstetään haluttuun muotoon. Ne eroavat toisistaan sulan muovimassan työstömenetelmän puolesta.

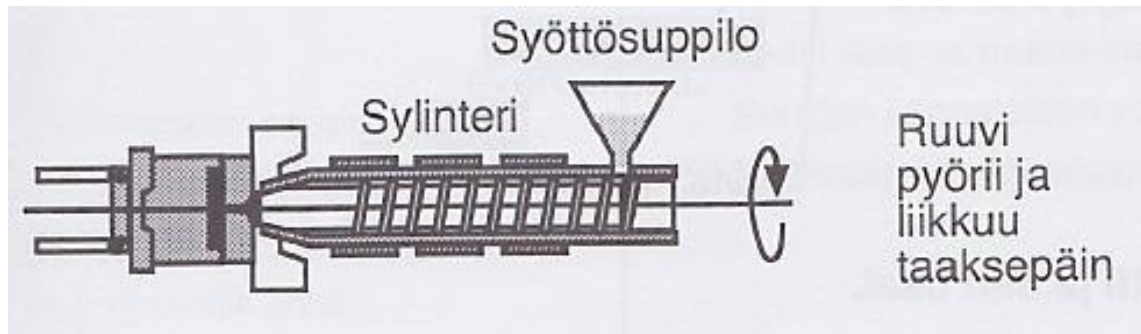
2.7.1 Ruiskuvalu

Ruiskuvalumenetelmän periaate on sulan muovin ruiskuttaminen ruuvin avulla kaksipuoliseen muottiin. Ruiskutustapahtuma on nopea ja ruiskutusaine suuri. Muovin sulattamiseksi käytetään kitkaa ja lämpöä. Menetelmästä käytetään myös nimitystä ruiskupuristus. [7, s. 275.]

Ruiskuvalumenetelmä soveltuu erityisesti suursarjatuontantoon ja sillä voidaan valmistaa laajalla skaalalla eri kokoisia ja muotoisia kappaleita. Etuina ovat myös prosessin nopeus ja helppous, sekä mahdollisuus automatisoida prosessi. Haittapuolia ovat ruiskuvalulaitteiden ja muottien korkeat hankintakustannukset. [6, s. 179; 7, s. 275.]

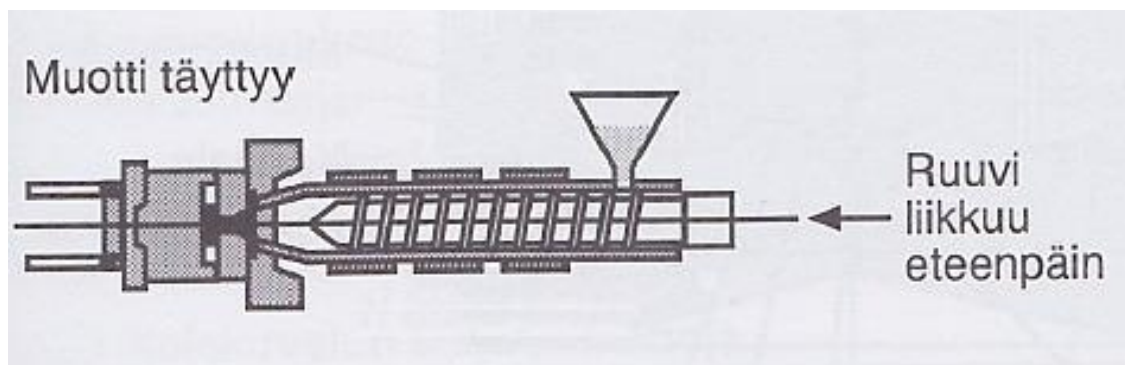
Ruiskuvalukoneen pääkomponentit ovat ruiskutusyksikkö, sulkuyksikkö, ohjausyksikkö sekä muotti. Toimintaperiaate jakautuu kolmeen vaiheeseen, joita ovat annostus ja plastisointi, ruiskutus ja jäähdytys sekä kappaleen poisto. [7, s. 277–278.]

Annostus ja plastisointi (kuva 8) tapahtuu ruiskutusyksikössä, joka sisältää syöttösuppilon, lämmitettävän sylinterin, ruuvin ja suuttimen. Syöttösuppilon kautta lisätään raaka-aine esimerkiksi granulaatteina. Sylinterissä oleva ruuvi liikkuu pyörien taaksepäin, jolloin sylinterissä jo oleva muovisula siirtyy eteenpäin. Samaan aikaan ruuviin syöttösuppilon kautta siirtyneet granulaatit plastisoituvat eli sulavat ja sekoittuvat. Sylinteriin muodostuu homogeeninen, eli tasalaatuinen seos. Plastisointi tapahtuu lämmön ja kitkan vaikutuksesta. Kitkan aikaansaa ruuvin pyöriminen. Tämän lisäksi sylinterissä on erillinen lämmitysjärjestelmä. [6, s. 176; 7, s. 277.]



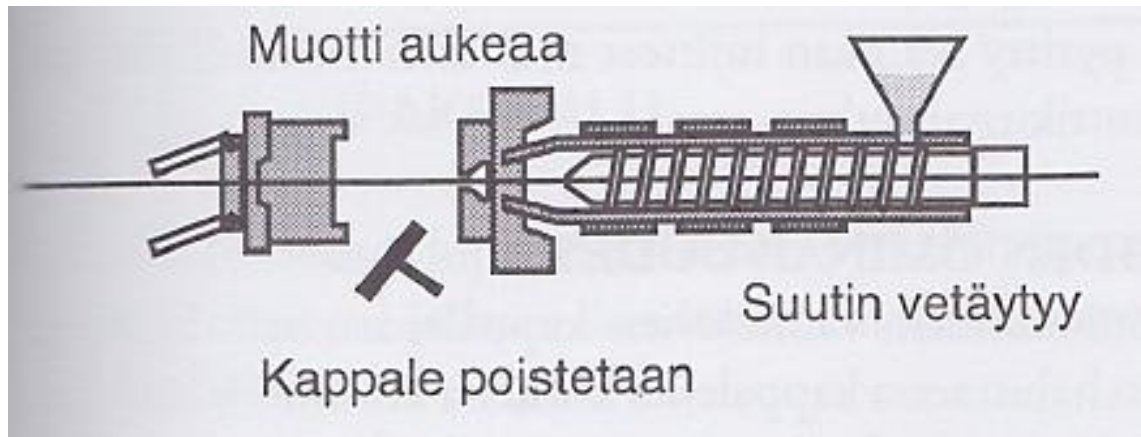
Kuva 8. Annostus ja plastisointi [6, s. 177 mukaillen]

Myös ruiskutus tapahtuu ruiskutusyksikössä kuvan 9 mukaisesti. Kuva havainnollistaa, kuinka ruuvien liike saa sulan muovin virtaamaan suuttimen läpi muottiin. Ruuvi toimii tässä tilanteessa ikään kuin mäntänä, joka työntää sulan muovimassan suurella paineella ja nopeudella eteenpäin. Muovi ei saa päästä virtaamaan takaisin ruuviin ruiskutusvaiheen aikana. Tämän takia ruuvien etuosassa on sulkurengas, joka toimii takaiskuventtiilinä. Varsinaisen ruiskutuksen jälkeen ilmaa siirretään muottiin pienellä paineella. Tätä vaihetta kutsutaan jälkipidoksi. Muovin ominaisuuksista johtuen muotissa oleva kappale kutistuu jäähtyessään. Jälkipidon aikainen paine täyttää materiaalin kutistumisen seurauksena syntyneen tyhjän tilan muotissa. [6, s. 176; 7, s. 277.]



Kuva 9. Ruiskutus [6, s. 177 mukaillen]

Sula muovimassa jäähtyy muotissa sen muotojen mukaiseksi kappaleeksi. Materiaalin jäähtyessä tapahtuu vielä sisäistä järjestäytymistä. Materiaalin on annettava jäähtyä muotissa riittävän pitkään, ettei kappaleeseen synny sisäisiä jännityksiä. Jäähdytysajan jälkeen sulkuyksikkö poistaa kappaleen muotista kuvan 10 mukaisesti. [7, s. 278.]



Kuva 10. Kappaleen poisto [6, s. 177]

Myös itse muotin lämpötila on tärkeä suure ruiskuvaluprosessissa. Muotin lämpötila asetetaan käytettävälle muovilaadulle sopivaksi. Kestumuoveilla muotti on kylmempi kuin siihen ruiskutettava muovimassa, jotta sula muovi kovettuisi vasta muotissa. Kertamuoveilla lämpö saa aikaan kemiallisen reaktion, joka kovettaa materiaalin. Tästä syystä muotin lämpötilan on oltava korkeampi kuin siihen ruiskutettavan muovimassan. [7, s. 281.]

Sulkuyksikkö huolehtii nimensä mukaisesti muotin sulkemisesta ja kiinni pitämisestä ruiskutuksen ja jäähtytyksen aikana. Jäähdytyksen jälkeen sulkuyksikkö avaa muotin ja poistaa valmiin kappaleen käyttäen esimerkiksi ulostyöntötappeja. Yleisesti sulkuyksikköä ohjaavat hydraulisyliinterit. [7, s. 279.]

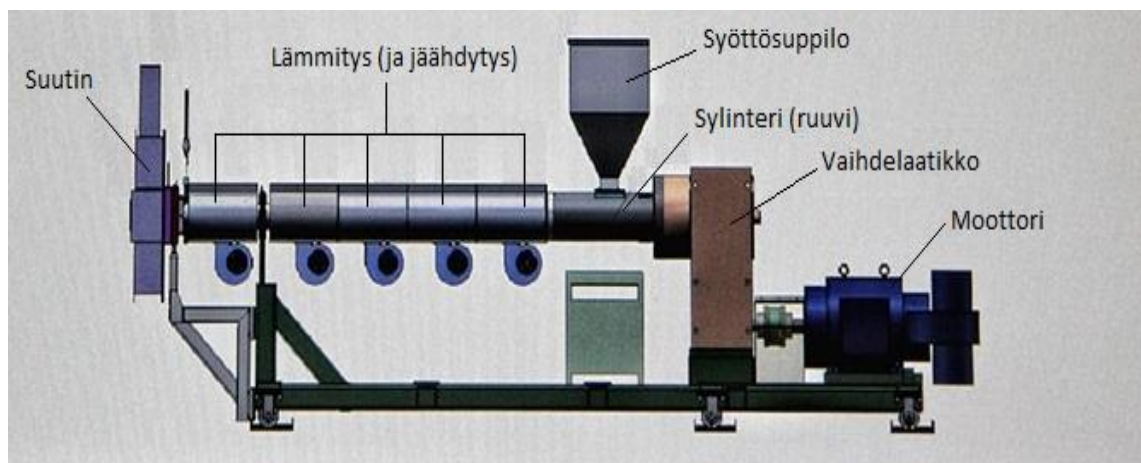
Ruiskuvalukoneessa on edellä mainittujen lisäksi ohjausyksikkö, jonka päätehtävät ovat prosessin ohjaus ja säätö. Ohjausyksikkö kerää tietoa muun muassa ruiskutus- ja suuttimen lämpötiloista. Nämä ovat myös säädettäviä suureita. Muita ohjausyksikön säätelmiä komponentteja ovat ruiskutus- ja sulkuyksikkö. [7, s. 279–280.]

Kuitulujitettujen muovien ruiskuvalussa ruuvien materiaalille tekemä plastisointi katkoo lujitekuituja. Kuitujen pilkkoutuminen aiheuttaa lujuusominaisuuksien alenemista. Tämän estämiseksi käytetään kaksoisruuvia, jolloin sula muovimassa etenee kahden ruuvien välissä. Kun ruuvien etäisyys toisistaan on tarpeeksi suuri, lujitekuitujen katkeaminen vähenee. Toinen vaihtoehto on käyttää muottia, johon materiaali ruiskutetaan kahdessa eri vaiheessa eri paineilla. [6, s. 177–178.]

2.7.2 Ekstruusio

Ekstruusio- eli suulakepuristusmenetelmän pääperiaate on hyvin samankaltainen kuin ruiskuvalussa. Myös tässä menetelmässä raaka-aineena toimiva muoviaine muokataan aluksi muovisulaksi. Muokkauksen suorittaa tässäkin valmistusmenetelmässä sylinterissä oleva ruuvi. Muovisulan käsittelymenetelmä eroaa kuitenkin ruiskuvalusta. Ekstruusioimenetelmässä suuttimen muotoilulla saatetaan sula muovimassa haluttuun muotoon. Tästä syystä menetelmä sopii muodoltaan yksinkertaisempien ja jatkuvien kappaleiden valmistukseen. Tällaisia kappaleita ovat esimerkiksi putket ja levyt. Menetelmää käytetään myös muoviteollisuuden raaka-aineena käytettävän granulaatin valmistuksessa. [7, s. 261.]

Ekstruuderilaitteisto on yleisesti kuvan 11 mukainen. Laitteiston tärkeimmät komponentit ovat moottori, vaihdelaatikko, ruuvin sisältävä sylinteri, syöttösuppilo sekä suutin. Sylinterin yhteydessä ovat lämmityselementit sekä sisällä ekstruuderin tyypistä riippuen joko yksi tai kaksi ruuvia. [7, s. 263.]



Kuva 11. Ekstruuderilaitteisto [16 mukaillen]

Plastisointiyksikkö koostuu sylinteristä sekä yhdestä tai kahdesta ruuvista. Sylinterin lämpötilaa hallitaan sitä ympäröivillä lämmityselementeillä. Usein näissä elementeissä on myös jäähdytysmahdollisuus. Yksiruuviekstruuderin on yleinen vaihtoehto ja sen raaka-aineena käytetään granulaatteja. Kaksiruuviekstruuderin raaka-aineena voidaan puolestaan käyttää puristusjauheita ja -massoja. Nimensä mukaisesti kaksiruuviekstruuderin pitää sisällään kaksi lomittain pyörivää ruuvia. [7, s. 261, s. 263.]

Syöttöruuvi on laitteiston oleellisimpia osia. Sen päätehtävät ovat raaka-aineen sulattaminen ja homogenisointi sekä siirtäminen suuttimelle. Ruuvin useasta tehtävästä johtuen sen geometria vaihtelee. Ruuvin geometria vaikuttaa ekstruusioprosessissa eri suureisiin, kuten esimerkiksi paineen nousuun. Erilaisia geometrioita käytetään haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi ja hallitsemiseksi. [7, s. 263–264.]

Muovimassa sulaa sylinterissä ruuvin aiheuttaman kitkalämmön ja/tai sylinteriä ympäröivien lämmityselementtien vaikutuksesta. Tehokas syöttö ruuvilla edellyttääkin suurta sylinterin ja muovimassan välistä kitkakerrointa. Vastaavasti ruuvin ja muovimassan välillä kitkakertoimen tulisi olla pieni. Ruuvin tehtävänä on myös homogenisoida polymeerimassa, tällöin lämpötila ja lisäaineiden jakautuminen massassa on tasaista. [7, s. 269, s. 271.]

Suuttimen geometrian valinnalla saadaan sulanut ja homogenisoitu muovimassa halutun muotoiseksi. Eri vaihtoehtoja ovat esimerkiksi putki-, tasokalvo-, levy- ja kalvonpuhallussuuttimet. Suuttimen läpi kulkevan muovimassan virtausnopeuden tulee olla tasainen. Valmistusvirheiden välttämiseksi suuttimessa ei saisi myöskään olla teräviä kulmia. [7, s. 266–267.]

2.8 UPM Formin käyttökohteita Biofore-konseptiautossa

Biofore-konseptiautossa UPM Formista on valmistettu pääosin sisustan paneeleja sekä ajoneuvon sivuhelmat ja etumaski. Monet kiinnitysratkaisut tehtiin liimaamalla muovikomposiittiosiin erilaisia kiinnikkeitä, joiden avulla ne kiinnitettiin ajoneuvoon. Kiinnikkeiden materiaalina käytettiin muun muassa terästä ja alumiinia. Jotkut sisustan osista olivat kooltaan suuria ja muodoiltaan monimutkaisia, jolloin ne tehtiin liimaamalla yhteen useampia eri lämpömuovattuja osia. Esimerkiksi kojelauta kasattiin yhteen useammasta eri osasta, jolloin liittäminen tapahtui saman materiaalin kanssa. Kuvassa 12 on yksi kattopalkeista, valkoinen ääriviiva on varsinaisen osan raja.



Kuva 12. Lämpömuovattu kattopalkki

Sisutan paneelit sekä etumaski on valmistettu polyeteenipohjaisesta UPM Formilevystä lämpömuovaamalla. Sivuhelmat on valmistettu samalla menetelmällä, mutta polypropeenipohjaisesta levystä. Käyttökokeiden perusteella polyeteenilevyt osoittautuivat paremmin lämpömuovautuviksi, joten polyeteeni toimi matriisimuovina loppulle valmistetuille osille. Kaikki materiaalista valmistetut osat joko maalattiin tai verhoiltiin, joten materiaalin käyttökohteet konseptiautossa eivät silmämääräisesti erotu.

Polyeteenilevyt on valmistettu luonnonkuituja sisältävistä granulaateista ekstruusiomenetelmällä. Levyjen selluloosakuitupitoisuus vaihteli välillä 20–30 %. Granulaatteihin on sekoitettu ekstruusiovaiheessa masterbatch-väriainetta, joka antaa levyille niiden mustan värin.

3 Liitosmenetelmät

Liitosmenetelmät jakautuvat liimaliitoksiin sekä mekaanisiin liitoksiin. Mekaaniset liitokset pitävät sisällään ruuvi-, pultti- ja niittiliitokset. Molemmissa pääliitosmenetelmissä liitoskohtaan suurimman rasituksen aiheuttavat leikkaus- sekä veto-puristusjännitys. [5, s. 422–423.] Taulukossa 4 vertaillaan näitä liitosmenetelmiä keskenään. Tämän opinnäytetyön kannalta oleellisia ovat seuraavissa luvuissa tarkasteltavat liimaliitokset.

Taulukko 4. Liitosmenetelmien vertailu [5, s. 423]

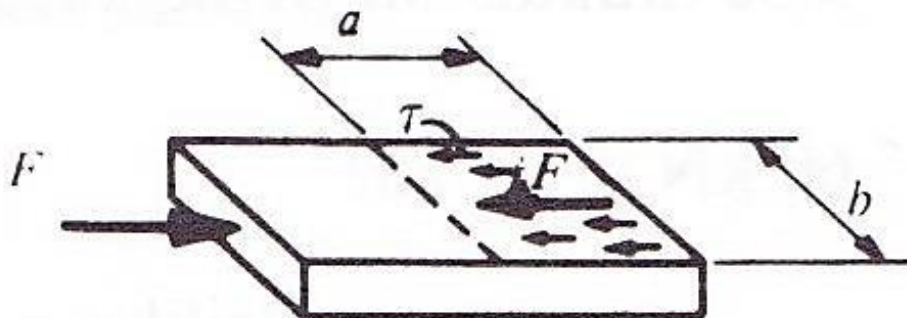
Liitostapa	Liima	Mekaaninen
Edut	<ul style="list-style-type: none"> • jännitys jakauma tasainen • pinnat tasaiset • liitokset tiiviitä 	<ul style="list-style-type: none"> • varmuus • yksinkertainen kokoonpano ja purku • helppo tarkastettavuus
Haitat	<ul style="list-style-type: none"> • mitoitusarvojen määrittäminen vaikeaa • tarkastus vaikeaa • ei purettavissa 	<ul style="list-style-type: none"> • jännityshuiput • ulkonevat liitososat • tiivistysvaikeudet

3.1 Liimaaliitokset

Rakenteellisen liiman tulee kestää huomattavia kuormia, sen ollessa vastuussa rakenteellisesta vahvuudesta ja jäykkyydestä. Sen tehtävä on liittää kaksi pintaa yhteen, täyttää niiden välinen rako sekä muodostaa väliin suojaava kerros. Liimasauman lujuuteen vaikuttaa kaksi eri ominaisuutta:

- Adheesio eli liima-aineen tartunta liimattavaan kappaleeseen. Adheesio perustuu kahden kappaleen välisistä, molekyylien sisäisistä voimista johtuvaan vetovoimaan. Liima-aineen toiminta perustuu adheesioilmiöön.
- Koheesio eli liima-aineen sisäinen lujuus. Sisäinen lujuus perustuu yhden kappaleen sisäisten molekyylien välisiin voimiin. [17, s. 4.]

Itse liima-aineella on kaksi merkittävää lujuusominaisuutta, leikkauslujuus sekä sitkeys eli vetokuormituksen kesto. Sauman on kestävä leikkausjännitystä, koska se on pääasiainen tapa, jolla voimat kappaleiden välillä liimaliitoksessa siirtyvät. Kuvan 13 mukaisesti leikkauspinnassa vaikuttaa pinnan suuntaisesti keskimääräinen leikkausjännitys T . Sitkeyttä ja vetokuormituksen kestoa taas vaaditaan, koska sauman päitä kuormittavat myös repivät voimat. Käyttökohteesta riippuen varsinaisten kuormitusten lisäksi liima-aine altistuu erilaisille lämpötiloille sekä mahdollisille kemikaaleille. [6, s. 113.]



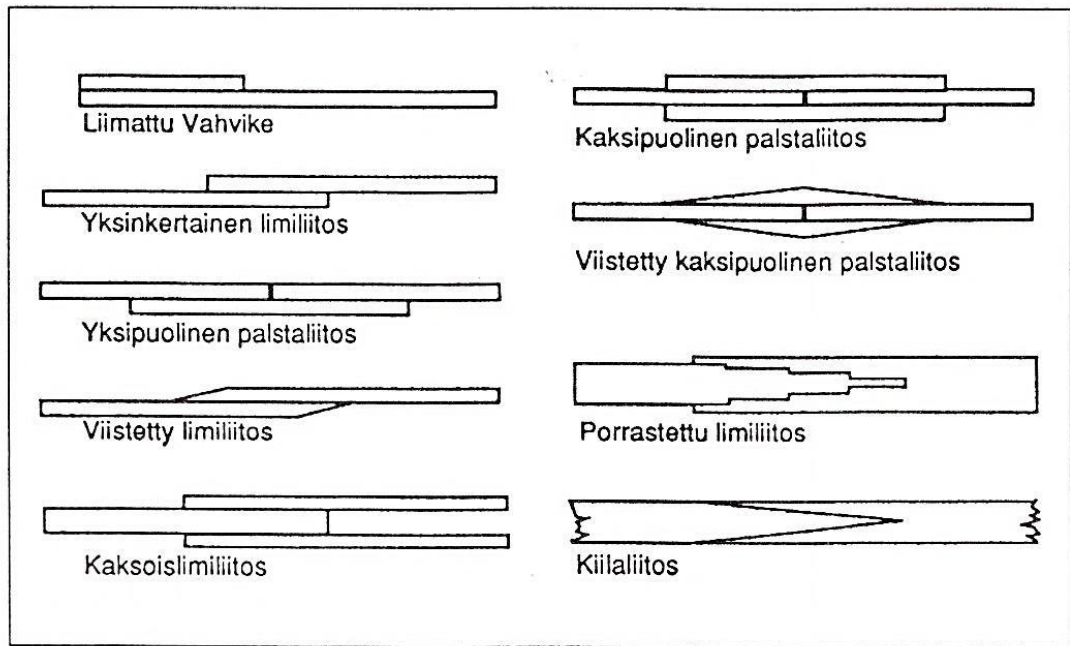
Kuva 13. Leikkausjännitys [18, s. 15]

Liima-aineen käytön kannalta oleelliset ominaisuudet liittyvät levitettävyyteen (liiman leviäminen ja käyttöaika), sauman laatuun (sauman paksuuden kontrollointi ja tasalaatuisuus) sekä kovettumiseen (kovettumislämpötila ja tarvittava puristusaine). Kovettumisprosessin osalta merkittävä tekijä on kovetuksessa tarvittava lämpötila. Prosessin luonne määräytyy liiman raaka-aineiden perusteella ja se voi olla joko kemiallinen reaktio, sulatilassa olevan liiman jäähtyminen tai liima-aineen sisältämän liuottimen haihtuminen. [6, s. 114–115.]

3.1.1 Liimaliitoksen rasitukset ja kestävyys

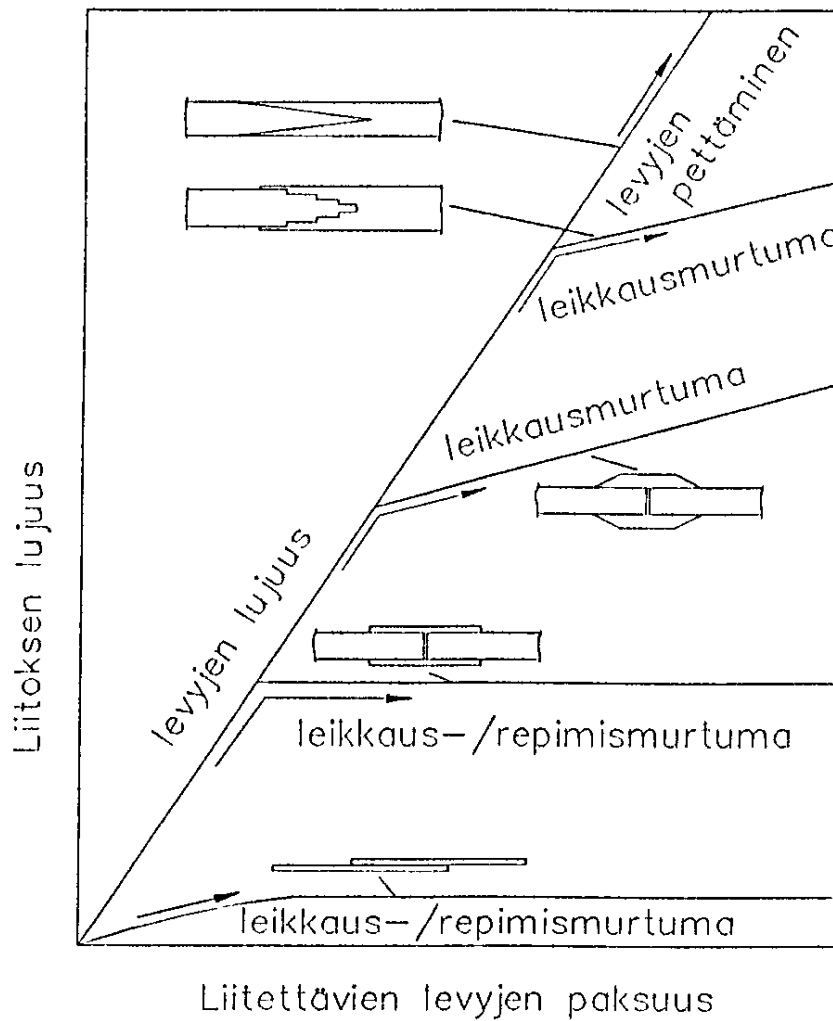
Liimaliitoksen pääkuormitustavat ovat leikkausjännitys sekä taivutus. Näistä kuormituksista johtuen voi liimaliitos pettää kolmella eri tavalla. Kestävin liitos on sellainen, jossa liimaliitos ei petä, vaan perusaine murtuu. Liima-aineen lujuuden ylittyessä itse liima-aine pettää. Tällaista murtumatyyppiä kutsutaan koheesiomurtumaksi ja siinä leikkauslujuus on ratkaiseva osa-alue. Heikoimmassa liitoksessa liima-aine irtoaa liimattavasta kappaleesta. Tällaista murtumatyyppiä kutsutaan adheesiomurtumaksi. [5, s. 432; 19, s. 35–37.]

Liimasauman kestävyteen vaikuttavat eniten sauman geometria ja liitosrakenne. Erilaisia liitosrakennetyyppejä on esitetty kuvassa 14. Liitosten kuormitettavuus, valmistusmenetelmät ja -kustannukset vaihtelevat liitostyyppistä riippuen. Oleellisin liitostyyppi tässä opinnäytetyössä on standardin ISO 4587 mukaisessa testausmenettelyssä käytettävä yksinkertainen limiliitos. [5, s. 432; 19, s. 33.]



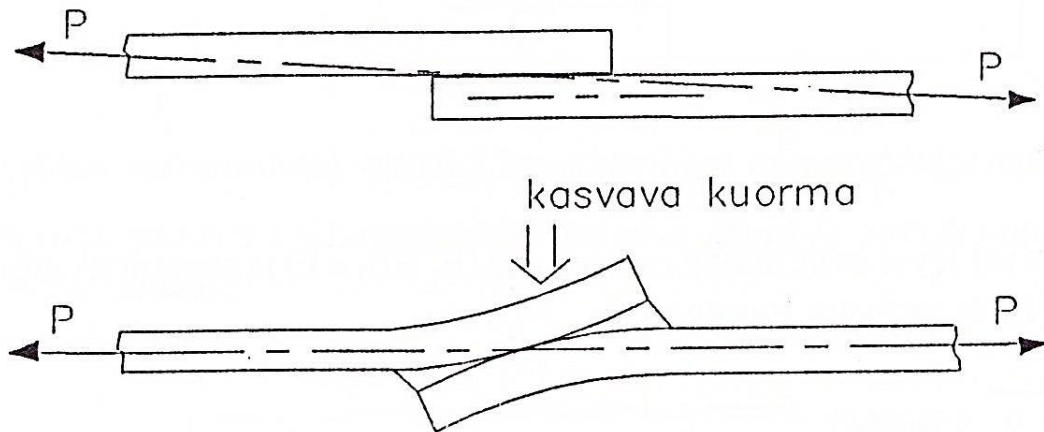
Kuva 14. Liimaliitoksia [19, s. 33]

Kuva 15 havainnollistaa liitettävien osien paksuuden vaikutusta liitoksen lujuuteen sekä esittää eri liitostapojen murtumismekanismeja. Kuvan perusteella kuormankantokyvyltään parhaimmat liitostyypit ovat kiilaliitos ja porrastettu limiliitos. Näiden liitostyyppien valmistaminen aiheuttaa korkeammat valmistuskustannukset, eivätkä ne ole välttämättä kaikissa tapauksissa edes mahdollisia valmistaa. Yksinkertaisen limiliitoksen lujuusominaisuudet ovat muihin liitostyyppeihin verrattuna heikot, mutta se on helppo valmistaa. [19, s. 33.]



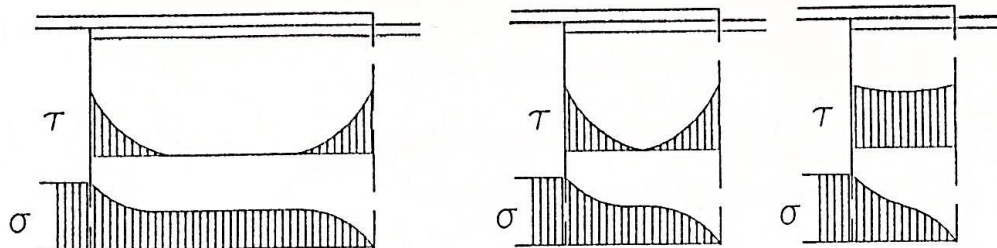
Kuva 15. Liitosten suhteellinen kuormankantokyky [5, s. 436]

Yksipuolista limisaumaa kuormittaa erityisesti taivutusmomentti kuvan 16 mukaisesti. Koska leikkausjännitys jakauma on epätasainen, kohdistuu liitoksen päihin taivutusmomentista aiheutuvia repiviä kuormia. Liimasauman epäsymmetrisyys vahvistaa taivutusmomentin aiheuttamia voimia. Liitettävien levyjen muotoilulla voidaan saavuttaa tasaisempi leikkausjännitys jakauma ja näin myös vähentää liimasauman päihin kohdistuvia rasituksia. [5, s. 432, s. 434–435; 19, s. 36.]



Kuva 16. Taivutuksen aiheuttama kuormitus limiliitoksessa [5, s. 433]

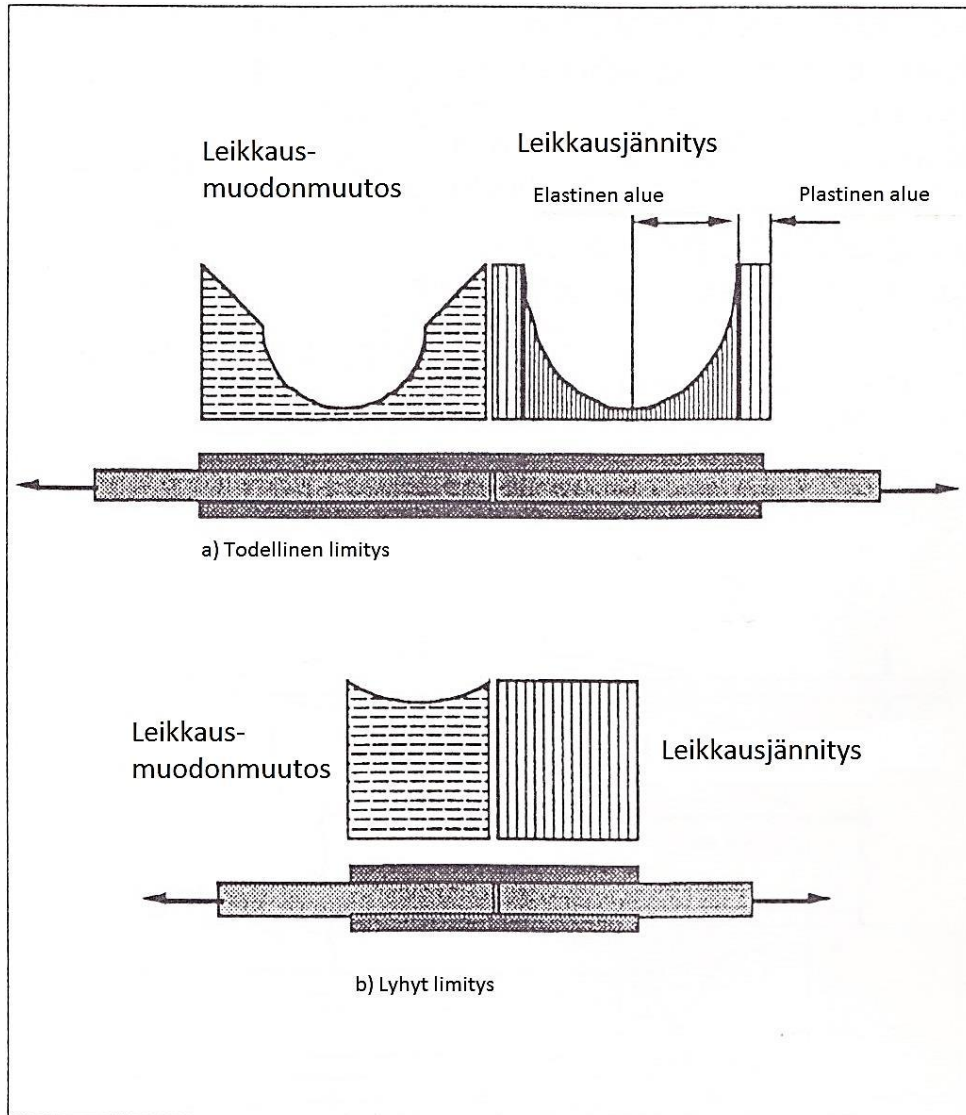
Liimasauman geometrialla on myös suuri vaikutus sauman lujuuteen. Erityisesti liitoksen pituus on ratkaiseva sauman lujuusominaisuuksien kannalta. [5, s. 432.] Kuva 17 esittää normaali- ja leikkausjännitys jakauman riippuvuutta sauman pituudesta. Kuvan mukaan lyhyen sauman leikkausjännitys jakauma on melko tasainen. Sauman pidentyessä kasvaa kuormitus päissä, kun taas sauman keskialue ei ole juuri lainkaan kuormitettu.



Kuva 17. Leikkausjännitys jakauma eri pituisissa liitoksissa [5, s. 433]

Ylipitkäksi mitoitettun sauman käytöllä saavutetaan kaksi etua. Se pystyy vastustamaan hyvin virumista, eli ajan kuluessa tapahtuvaa kuormituksesta johtuvaa muodonmuutosta. Toinen etu on varmuuskerroin, joka saavutetaan keskialueen alhaisen kuormituksen ansiosta. Kuva 18 havainnollistaa edellä mainittua tilannetta. Kuvassa molempien kappaleiden leikkausjännitys kuormitus päissä on sama, mutta liimasauman pituus eri. Pidemmän sauman pettäminen päistään ei aiheuta vielä koko sauman pettämistä. Tällöin plastiset muodonmuutosalueet sauman päissä kasvavat ja

keskialue ottaa vastaan saumaan kohdistuvat rasitukset, jolloin leikkausjännitys tällä alueella kasvaa. Lyhyellä liimasaumalla ei ole vastaavaa varmuusmarginaalia, joten sauma pettää äkillisesti. Kuvassa elastisella alueella muodonmuutokset palautuvat, kun rasitukset poistetaan. Plastisella alueella muodonmuutokset taas ovat pysyviä. [5, s. 437; 19, s. 43.]



Kuva 18. Leikkausjännitysalueen muodostuminen liitoksessa [19, s. 43]

Liimasauman paksuus vaikuttaa oleellisesti liimaliitoksen käyttäytymiseen kuormituksen alaisena. Ohuilla liimasaumoilla on yleisesti suurin leikkausjännityskestävyys. Mikäli liitettävien kappaleiden yhteensopivuus ei ole riittävän hyvä, joudutaan käyttämään paksuja liimasaumoja. Paksu liimasauma kestää myös

paremmin liitoksen epäsymmetrisestä jännitys jakaumasta johtuvia, päihin kohdistuvia repiviä kuormia. [5, s. 437.]

Myös liima-aine voidaan karkeasti ominaisuuksiensa perusteella jakaa jäykkään ja joustavaan liimaan. Yleisesti jäykät liimat ovat hauraita, omaavat suuren leikkauslujuuden sekä hyvän lämmönkeston. Jäykkää liimaa käytetään sellaisissa sovelluksissa, joissa pääkuormitustapana on leikkauskuormitus. Joustavia liimoja käytetään puolestaan taivutusmomentin kuormittamisissa sovelluksissa. Joustava liima kestää paremmin taivutusmomentin aiheuttamia, liimasauman päihin kohdistuvia repiviä kuormia. [5, s. 437.]

3.1.2 Liitoksen kuormitus laskennallisesti

Lyhyen liimasauman leikkausjännitys jakaumaa laskennallisesti arvioidessa on sauman leikkausjännitys oletettava vakioiksi ja liimattavat kappaleet jäykiksi. Näistä syistä sauman leikkausjännitys jakaumasta ei saada tarkkaa arvoa, vaan suuruusluokka, jonka avulla sauman kuormankantokykyä voidaan arvioida. Keskimääräinen leikkausjännitys lasketaan kaavalla

$$\tau = \frac{P}{bl}$$

jossa P on saumaa rasittava kuormitus (N), b on liimasauman leveys (mm) ja l on liimasauman pituus (mm). [5, s. 432–433.]

Pidemmän liimasauman leikkausjännitys jakauman arviointi on myös mahdollista. Tällöin on tehtävä seuraavat oletukset:

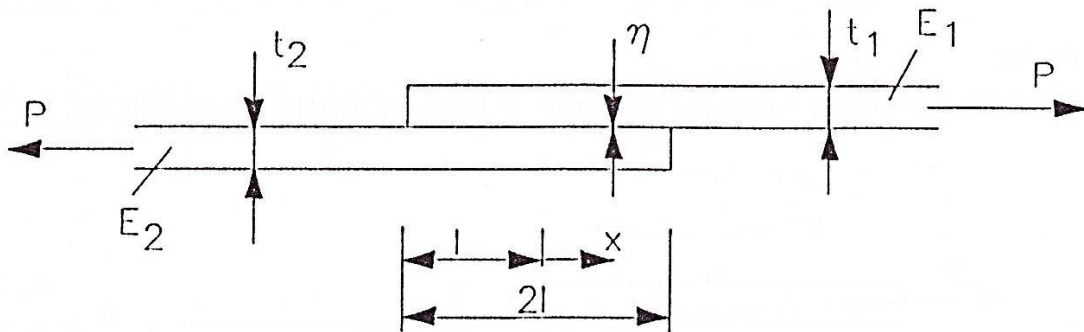
- Liimattavat kappaleet ovat ainoastaan veto- tai puristuskuormitettuja.
- Liima-aine on puhtaasti leikkauskuormitettu.
- Liimattava kappale ja liima-aine ovat lineaarisesti kimmoisia. Tällöin venymät ja liukuma ovat jännityksiin suoraan verrannollisia. [5, s. 433.]

Kuten lyhyen liimasauman kohdalla myös tässä tapauksessa, edellä mainituista oletuksista johtuen, ei leikkausjännitys jakaumasta saada tarkkaa arvoa. Pitkän

liimasauman leikkausjännityksen arvo sauman keskikohdalla voidaan arvioida nollaksi, edellisessä luvussa esitetyn leikkausjännitysjakauman perusteella. Tällöin pitkän liimasauman päissä olevalle leikkausjännityksen huippuarvolle saadaan yhtälö

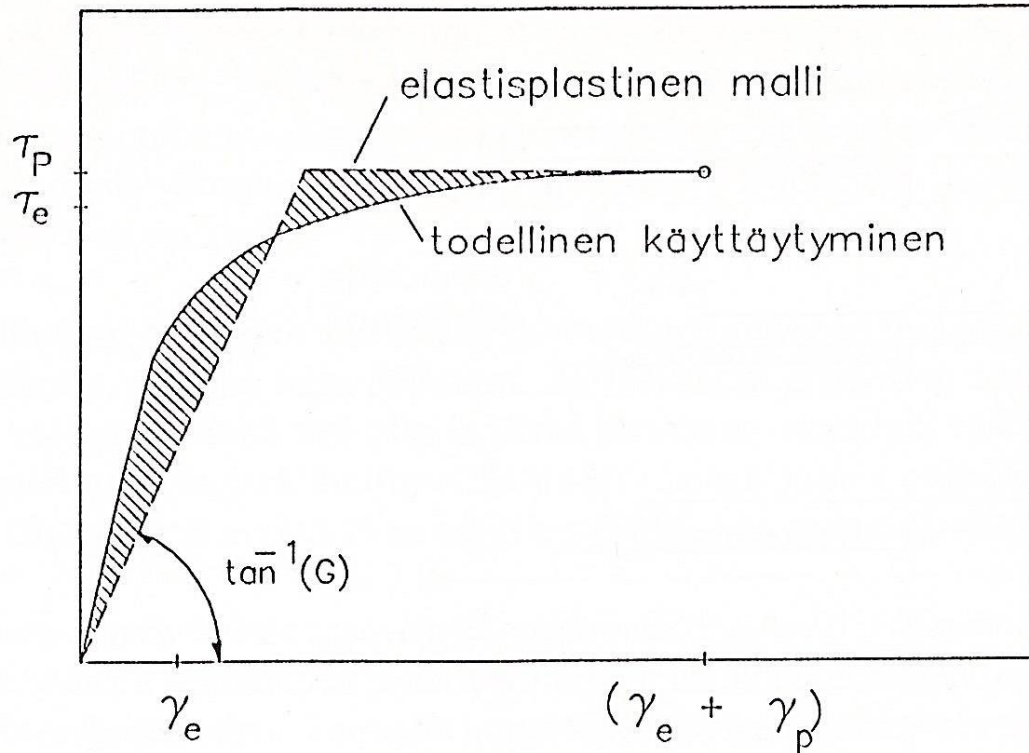
$$\tau = \frac{P}{\eta} \sqrt{\frac{G\eta}{2Et}}$$

jossa alla olevan kuvan 19 mukaisesti P on saumaa rasittava kuormitus (N), η on liimasauman paksuus (mm), G on liima-aineen liukukerroin (MPa), E liimattavan materiaalin kimmomoduli (MPa) ja t liimattavan levyn paksuus (mm). Yllä oleva yhtälö on voimassa vain, kun liimattavat levyt ovat saman paksuisia sekä samaa materiaalia. [5, s. 433–434.]



Kuva 19. Liimasauman kuormitukset ja mitat limiliitoksessa [5, s. 434]

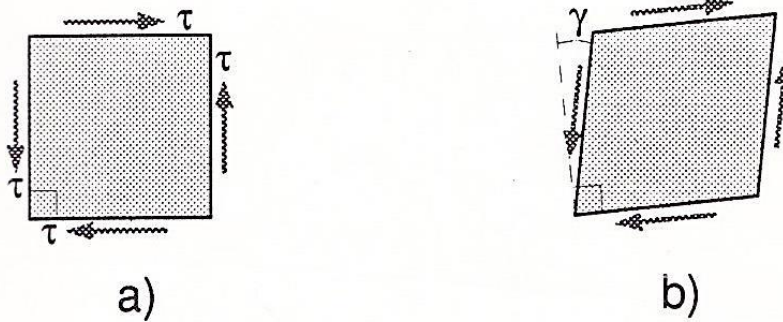
Liimasauman mitoituksessa myös murtokuorman arviointi on usein perusteltua. Kuorman arvioimiseksi täytyy liiman olettaa käyttäytyvän elastioplastisen mallin mukaisesti (kuva 20). Elastioplastisen mallin mukaan liima käyttäytyy aluksi ideaalikimmoisesti, ja tietyn rajan jälkeen ideaaliplastisesti. Ideaalikimmoisella, eli lineaarisesti kimmoisella alueella muodonmuutokset ovat palautuvia sekä suoraan verrannollisia kuormitukseen. Tällä alueella myös Hooken laki on voimassa. Ideaaliplastisella alueella tapahtuvat muodonmuutokset taas ovat pysyviä. Koska liiman todellinen käyttäytymismalli poikkeaa elastioplastisesta mallista, on lineaarinen approksimaatio sovitettava mitattujen suureiden avulla. Tällaisia suureita ovat murtojännitys τ_p , murtoliukuma $\gamma_e + \gamma_p$ ja murtoenergia. [5, s. 434–435; 20, s. 54.]



Kuva 20. Elastoplastisen mallin lineaarinen approksimaatio todelliseen käyttäytymiseen nähden [5, s. 435]

Elastoplastisen mallin mukaisesti käyttäytyvää liima-ainetta kuormitettaessa leikkausjännitys nousee aluksi lineaarisesti. Kuormituksen kasvaessa saavutetaan liiman myötöjännitys τ_e . Myötöjännityksen ylittyessä alkaa sauman päihin muodostua myötöalueet. Ne kantavat kuormaa tasaisesti, ja kuormituksen kasvaessa edelleen, nämä alueet pitenevät ja liukuma γ kasvaa. Liukuman saavuttaessa murtoa vastaavan arvon $\gamma_e + \gamma_p$ sauma peittää. Tällöin leikkausjännitys on saavuttanut murtojännityksen arvon τ_p . [5, s. 434.]

Liukuma eli liukukulma on leikkausjännityksen vaikutuksesta aiheutuva kulman muutos pintojen välillä. Kuvan 21 a-kohdan mukaisesti kuution sivuilla vaikuttaa leikkausjännitys. B-kohdassa nähdään sivujen kääntyneen toistensa suhteen leikkausjännityksen vaikutuksesta. Tämä sivujen välille syntynyt kulman muutos on liukuma γ . [20, s. 25.]



Kuva 21. Leikkausjännityksestä aiheutuva kulman muutos eli liukuma [20, s. 25]

Mikäli liukumapiirroksen alkuosa on lineaarinen, kuten elastioplastisen mallin tapauksessa, on silloin voimassa yhtälö

$$\tau = G\gamma$$

jossa τ on leikkausjännitys (MPa), γ on liukukulma (astetta) ja G on liukukerroin, materiaalista riippuva vakio (MPa). [20, s. 25–26.]

3.1.3 Adheesiot teoria

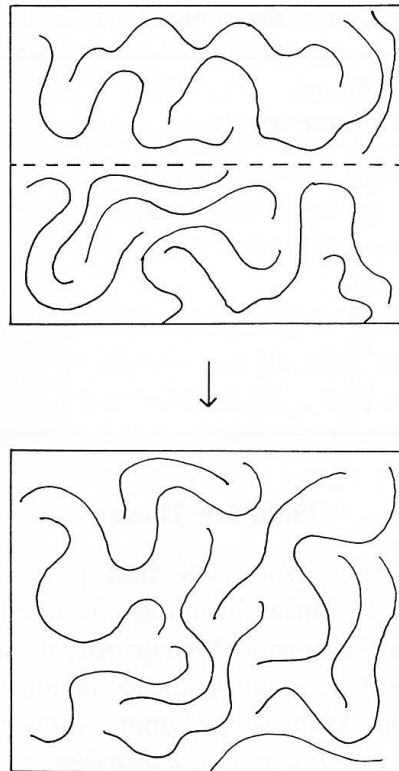
Kuten luvussa 3.1. todettiin, perustuu liima-aineen tartunta adheesioilmiöön. Adheesioilmiöstä ei kuitenkaan ole olemassa yhtä yhdistävää teoriaa, joka yhdistäisi materiaalien fysikaalis-kemialliset ominaisuudet varsinaiseksi liimaliitoksen fysikaaliseksi vahvuudeksi. On olemassa teorioita, jotka suuntaa-antavasti ennustavat liimaliitoksen vahvuutta, olettaen tartunnan olevan täydellinen sekä teorioita, jotka ennustavat vuorovaikutusten vahvuutta rajapinnoissa. Kuitenkaan ei ole olemassa yhtä yhtenevää teoriaa, joka selittäisi täydellisesti tartunnan, liima-aineen ja liimattavien kappaleiden fysikaalisten ominaisuuksien ja varsinaisen liitoksen lujuuden välisen yhteyden. [21, s. 118.]

Adheesio on kahden aineen välinen vetovoimien yhteisvaikutus ja se perustuu kuuteen pääilmiöön. Merkittävin näistä ilmiöistä on fysikaalinen adsorptio. Koska kaikkiin liimaliitoksiin liittyy molekyylien läheinen kontakti, täytyy fysikaalisen adsorption olla aina osallisena. Fysikaalinen adsorptio käsittää spesifisen adheesioin sekundaariset liitokset. Spesifinen adheesio käsittää liima-aineen ja liimapinnan väliset fysikaalis-

kemialliset ilmiöt. Spesifinen adheesio muodostuu kemiallisista liitoksista, joita ovat primääriset ja sekundääriset liitokset. Primäärisillä liitoksilla tarkoitetaan atomien välisiä liitoksia. Ne ovat vahvoja liitoksia, mutta niitä ei useinkaan ilmene liimaliitoksissa. Sen sijaan sekundääriset liitokset ovat merkittäviä liimasauman lujuuden suhteen. Ne ovat molekyylien välisiä liitoksia ja näin ollen heikompia kuin primääriset liitokset. Adsorptiolla tarkoitetaan prosessia, jossa molekyylit kiinnittyvät kiinteään aineen pintaan. Fysikaalisessa adsorptiossa molekyylit pysyvät kiinni pinnalla van der Waalsin voimien vaikutuksesta. Van der Waals -voimat ovat molekyylien välisiä vetovoimia, jotka aiheuttaa elektronien liike. [6, s. 221; 8, s. 29, s. 355; 22, s. 4–5; 23, s. 122.]

Muita adheesioilmiötä selittäviä teorioita ovat kemiallinen sitoutuminen, diffuusio, sähköstaattinen teoria, mekaaninen adheesio ja heikko sidoskerros -teoria. Kemiallinen sitoutuminen käsittää spesifisen adheesio primääriset liitokset. Liima-aineen ja liimattavan kappaleen rajapinnoilla muodostuu kovalenttisia sidoksia ja ionisidoksia. Ionisidoksen lujuus perustuu sähköstaattiseen vetovoimaan eri merkkisesti varautuneiden ionien välillä. Kovalenttisessa sidoksessa atomeilla taas on yhteiset sidoksenmuodostajaelektronit. Kovalenttisten sidosten ja ionisidosten sidosenergiat ovat huomattavasti voimakkaammat kuin van der Waals -tyyppiset sidosenergiat. [6, s. 221; 22, s. 4, s. 7; 23, s. 59–60; 24, s. 63–34.]

Diffuusioteoria perustuu kontaktissa olevien polymeerien diffundoitumiseen. Diffundoitumisella tarkoitetaan polymeerien välisen alkuperäisen rajan häviämistä kuvan 22 mukaisesti. Diffundoitumisen edellytyksenä on, että polymeeriketjut ovat yhteensopivia ja liikkuvia. Polymeeriketjut ovat liikkuvia, kun lämpötila on lasittumislämpötilan yläpuolella. [22, s. 9.]



Kuva 22. Diffundoituminen [22, s. 10]

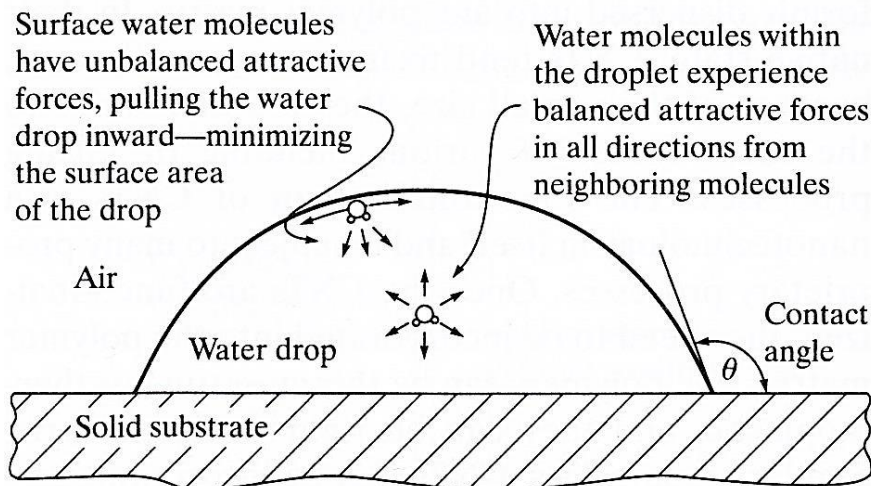
Sähköstaattinen teoria perustuu sähköisen kaksoiskerroksen aiheuttamaan vetovoimaan. Sähköinen kaksoiskerros syntyy esimerkiksi kahden metallin ollessa kontaktissa, elektronien siirtyessä niiden välillä. Polymeerit ovat kuitenkin hyviä eristeitä, joten sähköstaattinen teoria ei niiden tapauksessa juuri vaikuta adheesioilmiöön. [22, s. 9.]

Mekaaninen adheesio perustuu liimapinnan epätasaisuuksiin. Tartunta tapahtuu, kun näihin pinnan epätasaisuuksiin levinnyt liima kovettuu. [22, s. 10.]

Heikko sidoskerros -teoria perustuu kappaleiden rajapintaan muodostuvaan, koheesio-ominaisuuksiltaan heikkoon kerrokseen. Teorian mukaan liitoksen vahvuus on sama, kuin heikon kerroksen koheesion. Rajapintaan syntyvän heikon sidoskerroksen voi aiheuttaa rajapinnan epäpuhtaudet, kuten öljy tai rasva. Heikko sidoskerros voi syntyä myös liima-aineen tai liimattavan kappaleen ominaisuuksista johtuen. Heikon sidoskerroksen muodostumiseen vaikuttavat monet fysikaaliset, fysikaalis-kemialliset sekä kemialliset ilmiöt. [24, s. 56–57.]

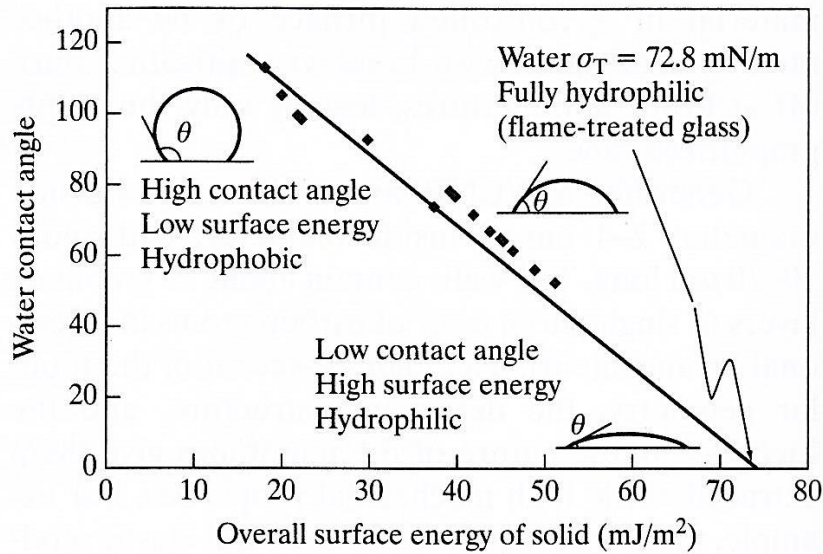
3.2 Polyolefiinien liittäminen

Polyolefiinit ovat matalan pintaenergian omaavia materiaaleja. Kiinteän aineen pintaenergia kuvaa pinnan kykyä luoda pinnalle kalvo, siihen levitettävästä nestemäisestä aineesta. Neste puolestaan yrittää vastustaa pinta-alansa kasvua pintajännityksen vaikutuksesta. Pintajännitysilmion aiheuttaa nesteen sisäiset, molekyylien väliset vetovoimat. Kuvan 23 mukaisesti nesteen sisällä oleviin molekyyliin kohdistuu muiden molekyylien vetovoima tasaisena joka suunnasta. Rajapinnassa oleviin molekyyliin kohdistuu taas nesteen ulkopuolelta paljon pienempi vetovoima kuin sisäpuolelta. Tästä syystä neste pyrkii pysymään kasassa ja rajapinnan molekyylit siirtymään sisäpuolelle. Mitä voimakkaammat molekylien välillä vaikuttavat vetovoimat ovat, sitä suurempi on nesteen pintajännitys. Muodostaakseen pinnallensa kalvon, on kiinteän aineen siis kyettävä vetämään nesteen molekyylejä vahvemmin puoleensa, kuin molekyylit vetävät toisiaan. [8, s. 47–48; 25.]



Kuva 23. Vesipisaran molekyylien väliset vetovoimat [26, s. 704]

Vesipisaran kosketuskulman avulla voidaan määrittää kiinteän aineen pintaenergia kuvan 24 mukaisesti. Kosketuskulman ollessa suuri, on pinnalla matala pintaenergia, eli se on hydrofobinen. Hydrofobinen aine on heikosti vesimolekyylejä puoleensa vetävä. Jos kosketuskulma taas on pieni, on pinnalla suuri pintaenergia, jolloin se on hydrofiilinen. Hydrofiilinen aine vetää vesimolekyylejä voimakkaasti puoleensa. [23, s. 336; 26, s. 704–705.]



Kuva 24. Pintaenergian määrittäminen vesipisaran kosketuskulman avulla [26, s. 704]

Liimaliitoksessa on nestemäisen liima-aineen muodostettava tasainen ja yhtenäinen kalvo. Spesifisen adheesion muodostumiseksi tulee liima-aineen olla tiiviisti kiinni liimapinnassa. Näin ollen sen täytyy syrjäyttää pinnalla olevat ilmahuokokset. Liimapinnan pintaenergian on oltava siis suurempi kuin liima-aineen pintajännityksen. Tällöin liima-aine muodostaa tasaisen kalvon eikä pisaroidu. [6, s. 221.]

Polyolefiinien pintaenergia on matalampi kuin useiden markkinoilla olevien liimojen pintajännitys. Tämä on suurin haaste polyolefiinien liimaliitoksissa. Ratkaisuna on joko kiinteän aineen pintaenergian nostaminen erilaisilla esikäsitteilytoimenpiteillä, joista tarkemmin luvussa 4.2, tai matalan pintaenergian omaavien materiaalien liittämiseen tarkoitetut erikoisliimat. Näitä liimoja käsitellään luvussa 3.2.1.

3.2.1 Liimat

Tässä insinöörityössä käytettäviksi liimoiksi valikoituivat rakenneliimat 3M DP-8005, Loctite 3038 ja Loctite 4090. Polyolefiinien liittämiseen tarkoitettuja liimoja on markkinoilla rajallisesti, ja nämä liimat valittiin niiden helppokäyttöisyyden sekä hyvän saatavuuden perusteella. Nämä liimat eivät myöskään vaadi liimattavien pintojen erikoiskäsittelyä, joten ne ovat nopeita käyttää. Molempien Loctiten tuotteiden kanssa käytettäväksi valmistaja suosittelee Loctite 770 -pohjustusainetta. Pohjustusaine

mahdollistaa adheesion matalan pintaenergian materiaaleilla. Pohjustusaineiden toimintaperiaatteita on esitelty tarkemmin luvussa 4.2. [27; 28; 29.]

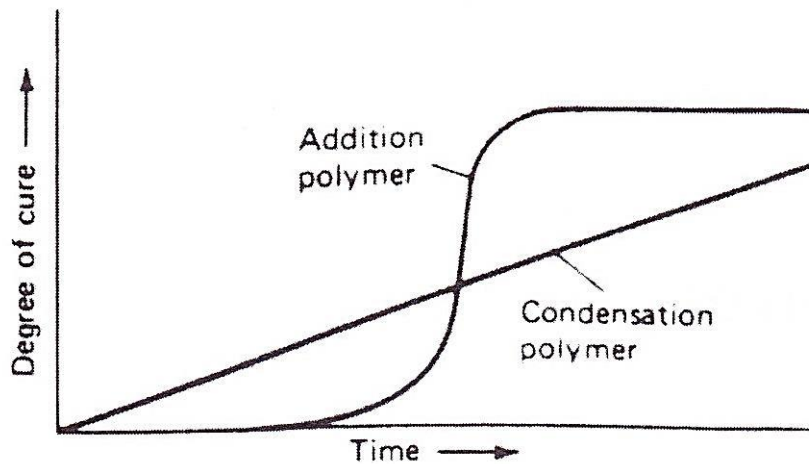
Valituilla liimoilla kovettumisprosessi tapahtuu huoneenlämmössä, ja niillä on hyvä kemiallinen kesto sekä lämmönkesto. Liimat sisältävät partikkeleita, joiden ansiosta liimasauman paksuutta voidaan kontrolloida ja suurempiakin rakoja täyttää. 3M DP-8005 ja Loctite 3038 ovat kaksikomponenttisiä akryyliiimoja. Loctite 4090 on myös kaksikomponenttinen, mutta koostumukseltaan syanoakrylaatti-epoksihybridiliima. Liimojen kovettumisprosessi perustuu kemialliseen reaktioon, joka alkaa liiman eri komponenttien sekoittuessa toisiinsa kuvan 25 mukaisen liimasekoittimen suuttimen päässä. [27; 28; 29.]



Kuva 25. Liimasekoitin

Akryyliiimojen kovettumisreaktio on yleisesti nopea verrattuna epoksi- ja uretaaniliimoille tyypillisiin kondensaatiokovettumisreaktioihin. Liimojen kovettuminen ajan suhteen on esitetty kuvassa 26. Akryyliiiman reaktion alkuvaiheessa on havaittavissa ainoastaan vähäistä polymerisaatiota. Liimausprosessissa tämä on etu, sillä näin on aikaa asetella liimattavat kappaleet kohdillensa. Polymerisaatioreaktio alkaa liiman eri komponenttien sekoittuessa toisiinsa ja akryyliiimoilla se tapahtuu huoneenlämmössä. Polymerisaatioreaktiossa useat eri monomeerit, eli molekyylit liittyvät yhteen muodostaen ketjun. Yleisesti rakenteellisten akryyliiimojen kovettumisreaktio on additio- eli lisäysreaktiotyyppinen. Kovettuminen on ketjureaktio,

joka etenee, kun kemialliset yksiköt reagoidessaan muodostavat uusia kemiallisia yksiköitä, johtaan näin polymeeriketjun nopeaan kasvuun. [23, s. 316; 24, s. 747–748.]



Kuva 26. Additioreaktio verrattuna kondensaatioreaktioon [24, s. 748]

Markkinoilla olevien akryyliiimojen tarkka kemiallinen koostumus on yritysten liikesalaisuus, mutta yleisesti liimat sisältävät akryylimonomeereja yhdistettynä useisiin eri polymeereihin. Lisäksi ne sisältävät useita komponentteja, joilla säädellään mm. liiman käsittelyominaisuuksia, joustavuutta sekä tasapainoa. [24, s. 749.]

Hybridiliimassa yhdistetään syanoakrylaatti- ja epoksiliimojen ominaisuudet. Syanoakrylaattiliimoissa polymerisaatioreaktion alulle panijana on liimapinnalle ilmakehästä absorboitunut vesi. Liimalle ominaista on polymerisaatioreaktion nopeus. Epoksiliimoille ominaista on liima-aineen hyvät adheesio- ja koheesio-ominaisuudet. [6, s. 116, s. 118; 28.]

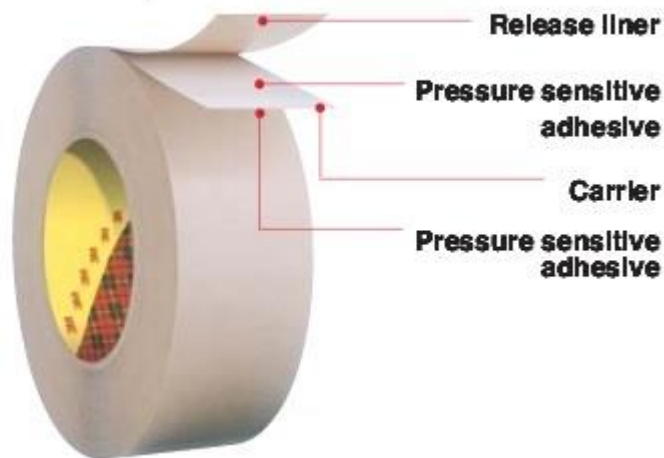
3.2.2 Liimakalvot

Testattaviksi liimakalvoiksi valittiin 3M Double Coated Tape 9088 ja AFTC High Performance Tape 6406LSE. Liimakalvot valittiin testattaviksi niiden helppokäyttöisyyden ja hyvän saatavuuden perusteella. Molemmat kuuluvat Pressure sensitive adhesives -luokkaan. Tähän kategoriaan kuuluville tuotteille on ominaista, että liima pysyy tahmeana vielä kovettumisenkin jälkeen. Tämä mahdollistaa aineen käytön liimakalvona. Liimakalvo tarttuu liimattavaan kappaleeseen, kun siihen kohdistetaan kevyt paine. Rajoittaviksi tekijöiksi liimakalvojen käytössä muodostuvat

usein rakenteellinen lujuus sekä rajoitettu geometria, johon kalvoa voidaan käyttää. [24, s. 839; 30; 31.]

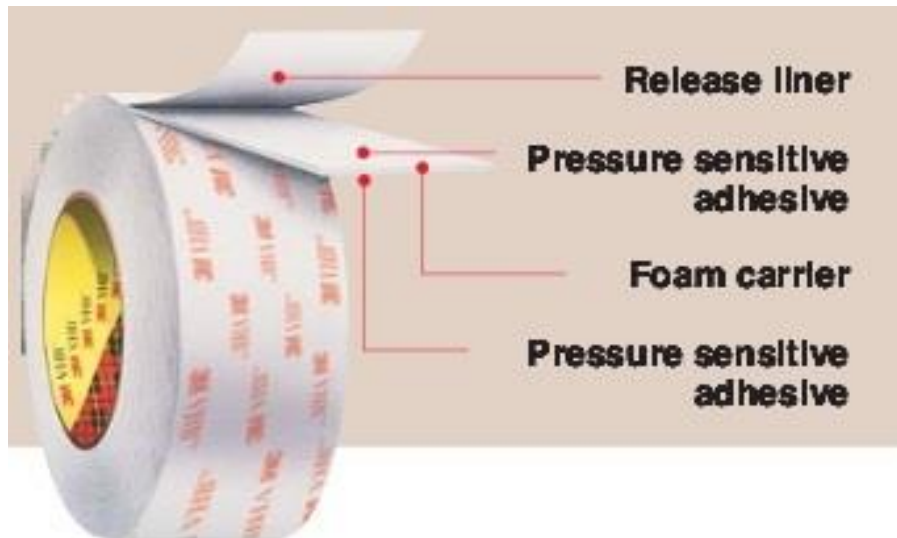
3M 9088 -liimakalvossa liima-aine on modifioitua akryyliä, tukiaine on polyesteriä ja päällimmäisenä kerroksena on pintapaperi kuvan 27 mukaisesti. Liimakalvon käyttö on yksinkertaista ja nopeaa, se asetetaan esimerkiksi liitettävien pintojen väliin ja pintoja painetaan kevyesti yhteen. [30]

3M™ Double Coated Tapes



Kuva 27. Liimakalvo [32 mukailleen]

AFTC LSE6406 -liimakalvossa liima-aine on myös akryylipohjaista. Kerrosrakenne on kuvan 28 mukainen. Tässä tuotteessa tukiaineena toimii vaahto, jolloin sillä voidaan liittää lämpölaajenemisominaisuuksiltaan erilaisia materiaaleja yhteen, koska vaahto tasaa muodostuvat lämpölaajenemiserot. [31]



Kuva 28. Akryylivaahoteippi [32 mukailten]

3.2.3 Kuumaliima

Kuumaliimaksi valittiin 3M Jet-Melt 3731 -kuumaliima erityisesti sen lämmönkesto-ominaisuuksien ja helppokäyttöisyyden vuoksi. Liimapuikko ja sen käyttämiseen vaadittava kuumaliimapistooli ovat kuvassa 29. Liima ei sisällä liuottimia, ja se kovettuu nopeasti. Liimauskohta ei tarvitse erityistä puristusta nopean kovettumisen vuoksi. Lisäksi liimalla on mahdollista täyttää suuriakin rakoja. Koostumukseltaan liimapuikko on kiinteää kestumuvihartsia. [33]



Kuva 29. Kuumaliimapistooli sekä -puikkoja [34]

Kuumaliimausprosessissa liimapuikko kuumennetaan liimapistoolissa sulatilaan, jonka jälkeen se liimapistoolin suuttimen kautta annostellaan haluttuun kohtaan. Liima voidaan lämmön avulla saattaa uudestaan sulatilaan, jolloin liitoskohdan muokkaaminen on mahdollista.

3.3 Ultraäänihitsaus

Ultraäänihitsauksessa hitsauslaitteisto muuttaa ultraäänitaajuudella värähtelevien aaltojen energian mekaaniseksi energiaksi. Mekaaninen värähtely kuumentaa hitsattavat pinnat. Pintojen kuumeneminen tapahtuu kappaleiden välisen sekä materiaalin sisäisen kitkan vaikutuksesta. Materiaalin hitsautumisen aiheuttavat hitsauspintojen kuumeneminen ja pintoihin kohdistettava puristusvoima. Oikein tehdyllä hitsausprosessilla voidaan saavuttaa lähes perusmateriaalin lujuutta vastaava sauma. [35, s. 1, s. 5–6.]

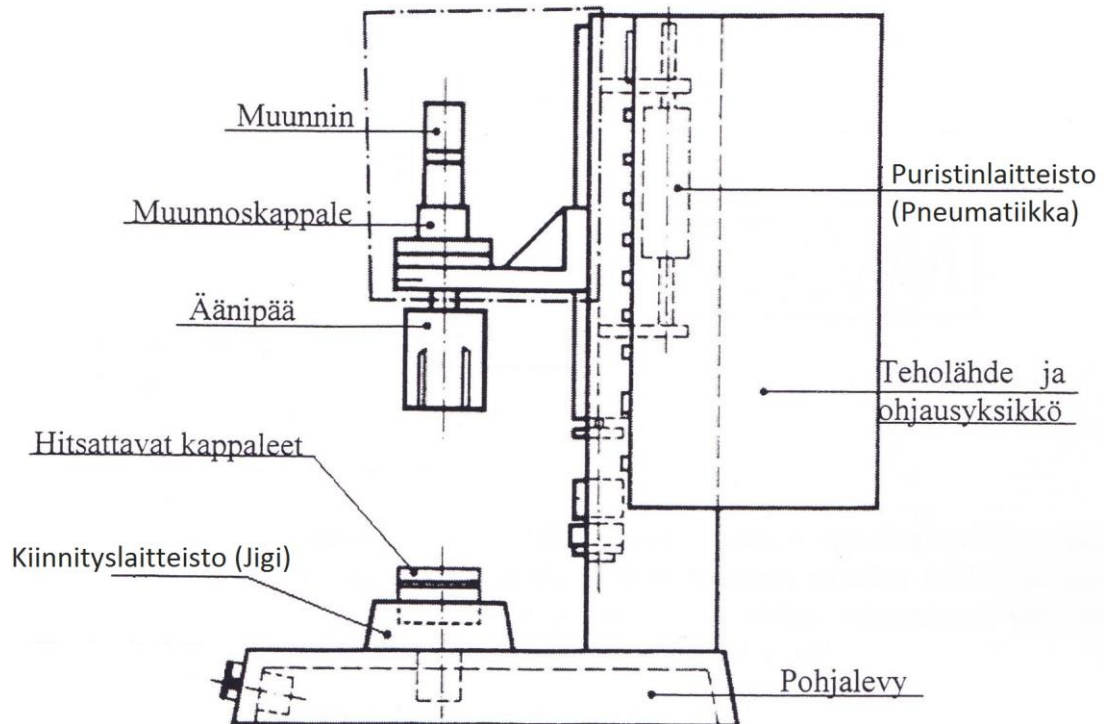
Materiaalin täytyy sulaa, jotta hitsausprosessi olisi mahdollinen. Tästä syystä ultraäänihitsaukseen soveltuvat lähinnä kestumuovit. Paras tulos saavutetaan, kun

liitettävät kappaleet ovat samaa materiaalia. Myös eri materiaalien hitsaus on kuitenkin mahdollista. Ultraäänihitsausprosessin etuja ovat prosessin nopeus, tehokkuus, puhtaus sekä toistettavuus. Prosessin heikkouksia taas ovat korkeat laitekustannukset sekä huono soveltuvuus suurille kappaleille. [35, s. 6, s. 8.]

3.3.1 Ultraäänihitsauslaitteisto ja prosessiparametrit

Ultraäänihitsauslaitteiston rakenne on kuvan 30 mukainen. Laitteiston eri osat tehtävineen ovat seuraavat:

- Ultraäänigeneraattori, joka tuottaa varsinaisen ultraäänialueella värähtelevän virran. Virta saadaan aikaan muuntamalla verkkovirta korkeataajuisiksi vaihtovirraksi.
- Ohjausyksikkö, joka sovittaa laitteiston eri toiminnot yhteen sekä kerää hitsausprosessista tietoa.
- Muunnin, jossa sähköenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi.
- Muunnoskappale, joka siirtää mekaanisen värähtelyn eteenpäin. Muunnoskappaleen geometrian avulla on mahdollista muokata värähtelyn amplitudia haluttuun suuntaan.
- Äänipää, joka suorittaa varsinaisen hitsaamisosuuden. Se välittää värähtelyenergian, puristusvoiman ja amplitudin hitsattaviin kappaleisiin.
- Puristinlaitteisto, joka painaa äänipään kiinni hitsattavaan kappaleeseen.
- Kiinnityslaitteisto, joka pitää hitsattavat kappaleet ensisijaisesti paikoillaan. Kiinnityslaitteiston avulla kappale myös asemoidaan oikeaan kohtaan. [35, s. 9–14.]



Kuva 30. Ultraäänihitsauslaitteisto [35, s. 9 mukailen]

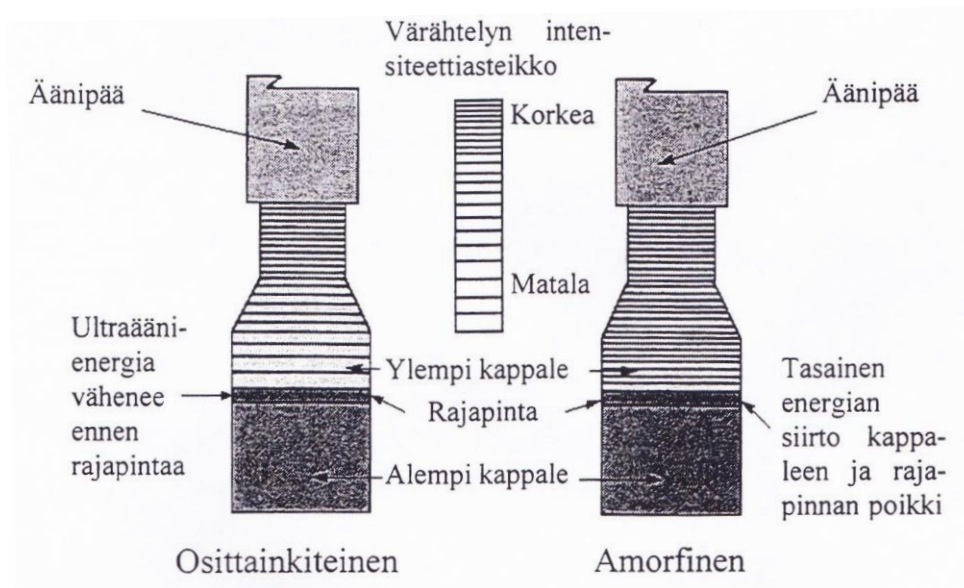
Ultraäänihitsauksen prosessiparametrit vaihtelevat erilaisilla materiaaleilla ja kappaleilla. Tärkeimmät prosessiparametrit ovat

- amplitudi, eli värähtelyn voimakkuus
- puristusvoima, eli kappaleisiin kohdistuva puristava voima hitsausprosessissa
- hitsaus- ja pitoaika, eli aika jolloin kappaleeseen kohdistetaan värähtelyä ja aika, jonka kappale jäähtyy puristuksen yhä vaikuttaessa siihen
- kytkentäpiste, eli ajankohta jolloin ultraääni kohdistetaan hitsattavaan kappaleeseen
- äänipään liikenoisuus, eli nopeus, jolla äänipää liikkuu pystysuunnassa. [35, s. 14–17.]

3.3.2 Hitsattavan materiaalin ominaisuuksien vaikutus

Materiaalien ominaisuudet vaikuttavat suuresti kappaleen hitsattavuuteen sekä prosessiparametreihin. Materiaalin rakenne vaikuttaa ultraäänihitsauksen tehokkuuteen

kuvan 31 mukaisesti. Osittain kiteinen rakenne vaimentaa värähtelyjen etenemistä kappaleessa, ja näin hankaloittaa materiaalin ultraäänihitsausta. Amorfisessa rakenteessa värähtelyt taas pääsevät etenemään tehokkaammin, ja se on siten helpommin hitsattavissa. [35, s. 18–20.]



Kuva 31. Materiaalin sisäisen rakenteen vaikutus [35, s. 19]

Myös osakiteisten ja amorfisten muovien erilaiset sulaominaisuudet vaikuttavat ultraäänihitsausprosessin lopputulokseen. Osakiteisten materiaalien sulamispiste on suhteellisen tarkka ja kapea-alainen. Tässä pisteessä materiaalin olomuodon muutokset kiinteästä sulaksi ja edelleen kiinteäksi tapahtuvat nopeasti. Näin ollen hitsausprosessi on tarkka, mutta onnistuu yleensä vain saman materiaalin kesken. Amorfisilla muoveilla taas ei ole tarkkaa sulamispistettä. Niissä pehmeneminen ja olomuodonmuutokset tapahtuvat asteittain, joten myös niiden yhteenliittäminen erilaisiin amorfisiin muoveihin on helpompaa. [35, s. 20.]

Materiaalin mekaanisista ominaisuuksista materiaalin jäykkyydellä on suuri vaikutus sen hitsattavuuteen. Jäykkyys vaikuttaa värähtelyjen etenemiseen, eli energiankuljetuskykyyn. Jäykässä materiaalissa värähtelyt etenevät paremmin, joten hitsauksessa tarvittavat energia ja amplitudi ovat pienempiä, kuin pienemmän jäykkyyden omaavia materiaaleja hitsattaessa. Lämpötila vaikuttaa materiaalin jäykkyyteen ja sen vaikutus eri rakenteille on erilainen. Amorfisten muovien jäykkyys lämpötilan funktiona laskee huomattavasti lasisiirtymälämpötilassa, kun taas osittain

kiteisillä muoveilla jäykkyys alenee hillitymmin lämpötilan noustessa, aina sulamispisteeseen saakka. [35, s. 21–23.]

Materiaalin hygroskooppisuus eli vedenimemiskyky vaikuttaa myös osaltaan ultraäänihitsauksen onnistumiseen. Materiaaliin imeytynyt vesi on haitallista, koska hitsauksen aikainen lämpötilan nousu saa veden höyrystymään. Tällöin hitsausaumasta tulee huokoinen. [35, s. 23.]

Myös muovien sisältämällä lisäaineilla on vaikutusta hitsausprosessiin. Täyte- ja lujiteaineet jäykistävät muovia, jolloin myös sen energiankuljetuskyky paranee. Näiden aineiden pitoisuusprosentin kasvaessa ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua matriisimuovin riittämättömyys sauman syntymiseksi. [35, s. 24.]

Väriaineet ja pigmentit ovat yleisesti ongelmattomia. Tietyissä tapauksissa ne saattavat kuitenkin vähentää kitkaa polymeeriketjujen välissä. Tämä aiheuttaa ongelmia, koska materiaalin sisäinen kitka on toinen pintojen lämpötilaa nostavista tekijöistä. Muut lisäaineet, kuten irrotusainejäämät, saattavat muiden epäpuhtauksien tavoin pienentää hitsattavien kappaleiden välistä kitkaa. [35, s. 23–25.]

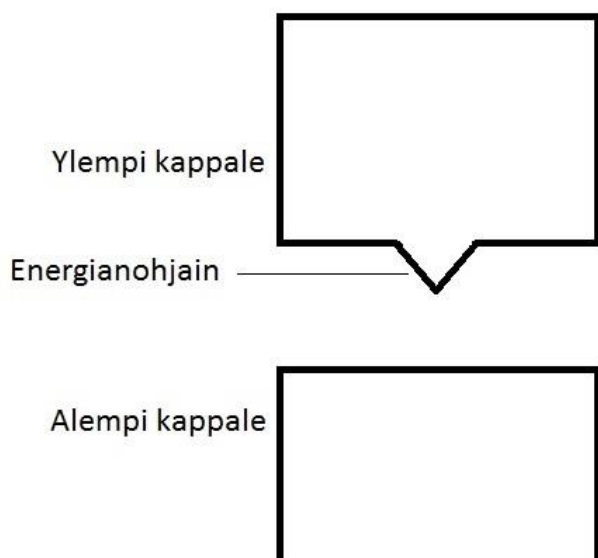
3.3.3 Ultraäänihitsausprosessi ja hitsattava kappale

Hitsausprosessi jakautuu toiminnallisesti seuraaviin vaiheisiin:

- kiinteän materiaalin kuumennus
- sulaminen, jolloin hitsausalueelta virtaa muovia pois
- vakiotila, jolloin muovin poisvirtaus hitsausalueelta on yhtä suuri, kuin sen sulaminen
- jähmettyminen, ultraäänien poiskytkennän jälkeen sula materiaali jäähtyy nopeasti. [35, s. 7.]

Hitsattavan kappaleen geometrian tulisi olla sellainen, että hitsattavien kappaleiden kosketuksessa oleva pinta-ala olisi aluksi mahdollisimman pieni. Tällöin energia kohdistuu oikeaan kohtaan ja materiaali sulaa nopeasti ja tehokkaasti. Tämän mahdollistamiseksi voidaan hitsattavissa kappaleissa käyttää kuvan 32 mukaista energianohjainta. Tämän lisäksi liitosalueiden tulee olla yhteensopivia ja kappaleiden

muotojen tai kiinnitysmenetelmien sellaisia, että kappaleet ovat oikeassa asennossa keskenään. [35, s. 28–29.]



Kuva 32. Energianohjain

Hitsattavien kappaleiden muotojen ja materiaalien mukaan on olemassa erilaisia liitostyyppejä. Hitsausharjaliitokset jakautuvat päittäis-, porras-, ja kieli- sekä uraliitoksiin. Päittäisliitoksissa liitettävät pinnat ovat päittäin toisiaan vasten. Päittäisliitoksissa tulisi käyttää energianohjainta. Porrasliitoksessa taas ylempi ja alempi kappale ovat porrastetusti limittäin. Kieli- ja uraliitoksessa yläkappaleen uloke on alakappaleen urassa. [35, s. 36, s. 38–39.]

Leikkausliitoksissa hitsaussauma on pystysuora. Kosketuspinta on porrastettu ja prosessin alussa pieni. Pintojen sulaessa alkavat kappaleet painua kiinni toisiinsa. [35, s. 40.]

Pistehitsauksessa yhdistetään tasopintoja toisiinsa. Liitettävien kappaleiden ollessa päällekkäin, äänipää lävistää ylemmän ja työntyy riittävän matkan alempaan, kuitenkin lävistämättä tätä. Äänipää syrjäyttää tilavuutensa verran muovianetta saumasta. Tämä sula muovianne muovautuu äänipään geometrian mukaisesti yläkappaleen pinnalle renkaaksi. [35, s. 42.]

4 Liimausprosessi

Toimivan ja lujuusominaisuuksiltaan kestävä liimasauman edellytykset ovat käyttökohteeseen ja materiaaleille soveltuva liima-aine, liimapintojen mahdollisesti vaatimat esikäsitteilytoimenpiteet sekä liima-aineelle soveltuvat kovetusolosuhteet. [6, s. 221]

Liimausprosessi kokonaisuudessaan käsittää liitoksen suunnittelun, liimapintojen esikäsitteilyn sekä itse liimaliitoksen tekemisen ja liima-aineen kovettumisen. Näitä osaluokkia tarkastellaan seuraavissa luvuissa tarkemmin. Lisäksi liitteeseen 1 on kerätty kohta kohdalta etenevä liimausohje, joka on tehty polyolefiinien liittämisen pohjalta, mutta sitä voidaan soveltaa myös muiden materiaalien liimausprosesseissa.

4.1 Liimaliitoksen suunnitteluperusteet

Seuraavassa on listattu lähtökohtia, joiden perusteella liimausprosessi on hyvä suunnitella ja liimasauma mitoittaa.

- Liitoksen kuormitus: Ensimmäinen lähtökohta on selvittää liitoksen kuormitustavat, eli minkälaisia voimia liitokseen kohdistuu sekä onko liimasauma rakenteellinen osa. Lisäksi on huomioitava ympäristön vaikutukset liitokseen, esimerkiksi lämpötila sekä mahdollinen altistuminen kemikaaleille. Myös sauman siisteys tulee ottaa huomioon, mikäli liitos on näkyvä osa.
- Liitostyyppi: Oikean liitostyyppin valinta on oleellinen kohta liimausprosessin kannalta. Tähän vaikuttavat erityisesti valmistus- ja kustannustekniset syyt. Vaihtoehtoja ovat mm. helposti valmistettavissa oleva limi- tai palstaliitos, tai suurempaa kuormitusta kestävä, mutta hankalemmin valmistettavissa oleva liitos. Liitettävien osien geometria saattaa muodostua rajoittavaksi tekijäksi liitostyyppin valinnassa.
- Liiman valinta: Liimatyyppin on oltava liitettäville materiaaleille sopiva pitävän liitoksen muodostumiseksi. Lisäksi tulee miettiä, pitääkö liimasauman täyttää rakoa tai kuinka paksu liimasauma halutaan. Soveltuva liima voidaan valita esimerkiksi juoksevista liimoista, liimakalvoista tai kuumaliimoista.
- Liimapintojen esikäsitteilytoimenpiteet: Riittääkö pintojen puhdistaminen epäpuhtauksista, vai tarvitaanko pinnoille erikoiskäsittelyä. Pintakäsittelyvaihtoehtoja käydään läpi tarkemmin luvussa 4.2.

- Liitoksen mitoitaminen: Liimasauman lujuuden laskemiseen on esitetty kaavoja luvussa 3.1.2, mutta kuten todettua, niillä ei ole mahdollista määrittää tarkkaa sauman leikkausjännityksen suuruutta. Vertailua kannattaa tehdä omien testien sekä esimerkiksi liima-aineen valmistajalta saatavan tiedon pohjalta. [19, s. 41.]

4.2 Liimapintojen esikäsittely

Pitävän liitoksen aikaansaamiseksi on liimapinnat aina puhdistettava epäpuhtauksista, kuten rasvasta, kosteudesta tai muusta liasta. Pintojen puhdistaminen suoritetaan pyyhkimällä ne liuottimilla, jotka haihtuvat liimapinnalta nopeasti. Erityisesti polyolefiinien liitoksissa jotkin liima-aineet vaativat pitävän adheesio mahdollistamiseksi pintojen erikoiskäsittelyä, kuten mekaanista karhennusta, syövytyskäsittelyä, liekitystä, korona- tai plasmakäsittelyä. Haittapuolena näissä pintakäsittelyissä on niiden myötä tuleva ylimääräinen vaihe liimausprosessiin ja siitä syntyvät kustannukset. [6, s. 223.]

Mekaanisessa karhennuksessa pinnat käydään läpi esimerkiksi karkealla hiomapaperilla. Tarkoituksena on tällä tavoin kasvattaa liimauspinnan pinta-alaa. Karhennuksen jälkeen on tärkeää muistaa puhdistaa pinta irrallisista hiukkasista. [25]

Syövytyskäsittely perustuu myös liimauspinta-alan suurentamiseen. Polypropeenin ja polyeteenin syövytykseen käytetään natriumkarbonaattirikkihappoliuosta. Syövytyskäsittely on aikaa vievää, koska hapon vaikuttamiseen kuluu tietty aika. Tämän käsittelyn yhteydessä tulee huomioida työturvallisuusasiat, koska rikkihappo on vahvasti syövyttävää. Lisäksi syövytyskäsittelyä tulee seurata puhdistus- ja kuivauskäsittely. [25]

Liekityksessä liimapinta käsitellään viemällä liekki pinnan ohi. Tällöin pinta hapettuu ja siihen muodostuu oksidikerros. Tämä parantaa pinnan kemiallista toiminnallisuutta sekä nostaa sen pintaenergiaa. Kestomuovien kanssa liekityskäsittelyllä on omat riskinsä, sillä vaikka liekkikosketus on vain hetkellinen, voi osaan syntyä vääntymistä. Yleensä kestomuovien kanssa liekityskäsittelyä käytetään vain suurille ja paksuille osille. [25]

Koronakäsittely parantaa myös pinnan toiminnallisuutta sekä nostaa sen pintaenergiaa. Käsittely suoritetaan korkeajännitelähteen avulla. Jännitelähteen tuottama

korkeataajuuksinen virta johdetaan elektrodiin, jolla liimapinta käsitellään. Liimattava osa viedään joko elektrodin yli, tai elektrodi liimattavan osan yli. Käsittelyn vaikutusaikaa on hankala määrittää, sillä siihen vaikuttavat materiaalin ominaisuudet sekä muut mahdolliset pinnan käsittelyt. Liittämisen olisi hyvä tapahtua mahdollisimman pian käsittelyn jälkeen. [25]

Plasmakäsittely sopii erityisesti kappaleille, jotka ovat geometrialtaan hankalia, eikä tästä syystä muita käsittelyjä voida soveltaa. Plasma on ns. aineen neljäs olomuoto ja se muodostuu kun kaasuluomuodossa olevaan aineeseen tuodaan riittävästi energiaa. Plasmakäsittely vaikuttaa kappaleen pintaan kolmella eri tavalla:

- Se poistaa pinnan epäpuhtauksia sekä heikosti sitoutuneita polymeerikerroksia.
- Se auttaa liiman leviämistä pinnalle. Tämä tapahtuu liittämällä yhteen toiminnallisia tai polaarisia ryhmiä, jotka edistävät liiman leviämistä.
- Se muodostaa liimapinnalle toiminnallisia ryhmiä, jotka mahdollistavat kovalenttisten sidosten muodostumisen liimapinnan ja liiman välille. [24, s. 194–195; 25.]

Näiden pintakäsittelyvaihtoehtojen lisäksi liimavalmistajilla on erilaisia pohjustusaineita polyolefiinien liittämiseen tarkoitetuille liimoille. Pohjustusaineita käytetään parantamaan liitosta. Ne toimivat kahdella vaihtoehtoisella periaatteella:

- Orgaaniset liuotteet syövyttävät pintaa samalla periaatteella kuin syövytyskäsittely. Ne toimivat nopeasti, eikä niitä tarvitse pestä pinnalta pois.
- Pohjustusaineen liimaan on sekoitettuna alusaineena toimivaa liuotinta. Tällöin sekoitus kiinnittyy polyolefiinin pintaan, jonka jälkeen liuotinosi haihtuu jättäen vain liimaosan pinnalle. Liitospinnan kemialliset ominaisuudet muuttuvat polyolefiineille tyypillisistä merkittävästi pohjustusaineen liimaosan mukaisiksi, ja näin mahdollistavat liittämisen.

Myös pohjustusaineiden käytössä haittana on liitosprosessiin tuleva ylimääräinen vaihe, ja siitä aiheutuvat kustannukset. [25]

4.3 Liimaus ja liima-aineen kovettuminen

Liimauksessa tulisi ensisijaisesti ottaa huomioon liima-aineen valmistajan antamat ohjeet. Näistä selviävät muun muassa liimapintojen esikäsittelytoimenpiteet, liiman käyttöohje, kovettumisaika ja -olosuhteet sekä työturvallisuusvaatimukset. Jotkut liima-aineet saattavat olla esimerkiksi ihoa ärsyttäviä ja hengityselimille vaarallisia. Liimaukseen ja liiman kovettumiseen liittyen tulee myös huomioida työskentelytilan lämpötila sekä ilmankosteus.

Yleisesti liima-aineen kovettumisen aikaansaa lämmön ja paineen yhteisvaikutus. Useiden liima-aineiden tapauksessa kovettuminen on mahdollista huoneenlämpötilassa ja tarvittavan paineen aikaansaa liimapintojen puristuminen toisiaan vasten. Korkeampi lämpötila nopeuttaa kovettumisreaktiota ja joissain tapauksissa sitä myös vaaditaan sen aikaansaamiseksi. Suuremman puristavan paineen aikaansaamiseksi käytetään ruuveja ja puristimia. Tähän tarkoitukseen voidaan käyttää myös alipainesäkkejä sekä autoklaaveja. [6, s. 224.]

5 Liimaliitosten testimenettelyt

Adheesiota eri liima-aineiden ja biokomposiittimuovien välillä tutkittiin standardia ISO 4587 mukailleen. Standardin periaate on liimata tietyn kokoisia suorakaiteen muotoisia kappaleita limittäin yhteen. Vetokokeessa mitataan voima, joka tarvitaan liitoksen rikkomiseen ja liitospinta-alan avulla saadaan laskettua murtumisjännitys. Tässä opinnäytetyössä käytetyt testimenetelmät poikkeavat joiltain osin standardin mukaisista, mutta menetelmät ovat samat jokaiselle testikappaleelle, joten tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia ja antavat riittävää tietoa luvussa 1.2 määritettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi. Jokainen poikkeus on selvitetty seuraavissa luvuissa. Suurimmat poikkeukset standardiin nähden olivat testikappaleiden erilainen geometria ja mitat.

Standardin mukaisessa vetokokeessa saadaan tuloksena liitoksen veto-leikkauslujuus. Koska kyseessä on limiliitos, tuloksena ei saada puhdasta leikkauslujuuden arvoa. Saatuun lujuuteen sisältyy myös taivutuksen vaikutus. Näiden kahden osuutta saadusta lopputuloksesta ei ole mahdollista erottaa toisistaan. Standardin mukaisen

testin lopputulos on kuitenkin käytännöllinen, koska se mukailee hyvin todellisia käyttökohteita ja rakenteita. [19, s. 41.]

Testattavana materiaalina oli UPM Formi -granulaattia 20, 30, 40 ja 50 prosentin selluloosakuitupitoisuuksilla. Lisäksi tutkittavana materiaalina oli kahta erilaatua polyeteenipohjaisesta UPM Formi-granulaatista ekstruusiomenetelmällä valmistettua levyä. Valmistajan mukaan levyjen selluloosakuitupitoisuus oli 20–30 prosenttia.

Testeissä käytettyjä liimoja olivat nestemäiset liimat 3M DP-8005, Loctite 3038 ja Loctite 4090. Molempien Loctite-tuotteiden kanssa käytettiin Loctite 770 - pohjustusainetta. Käytettyjä liimakalvoja olivat 3M Double Coated Tape 9088 ja AFTC High Performance Tape 6406LSE. Testeissä käytetty kuumaliima puolestaan oli 3M Jet-Melt 3731.

Huomioitavaa on, että testimenettelyssä tarkastellaan ainoastaan adheesiota, muihin liimasauman ominaisuuksiin puuttumatta. Muita ominaisuuksia, kuten sauman paksuuden vaikutusta liitoksen lujuuteen, liima-aineen kemikaalin- tai lämmönkestoa, ei testijärjestelyssä tarkastella. Nämä ominaisuudet löytyvät valmistajan ilmoittamista tiedoista liitteistä 2–7. Ne ovat liima-aineen ominaisuuksia, eivät niinkään liimattavasta materiaalista riippuvaisia.

5.1 Testikappaleiden valmistus

Testikappaleita valmistettiin kahdella eri tavalla. Eri kuitupitoisuuksien omaavista granulaateista ruiskuvalettiin standardin ASTM D 638 mukaisia vetosauvoja. Nämä vetosauvat eivät ole standardin ISO 4587 määrittelemiä testauskappaleita, mutta kyseinen koe voidaan niillä suorittaa ja saada keskenään vertailukelpoisia tuloksia. Vetosauvojen valmistamiseksi granulaatteja kuivattiin kosteuden poistamiseksi 3 tuntia lämpötilassa 105 °C valmistajan ohjeen mukaisesti. Oikeiden työstöarvojen löytämiseksi tarkasteltiin vetosauvojen tasalaatuisuutta silmin sekä suoritettiin myös standardin 527-2 mukaisia vetokokeita, joilla voitiin todeta murtumisvetojännityksen olevan samassa suuruusluokassa granulaattien valmistajan ilmoittamien arvojen kanssa.

Testeissä käytetyn polyeteenipohjaisen levyn paksuus oli 3 mm, joten se poikkesi standardin mukaisesta 1,6 mm:stä. Lisäksi liimattavien kappaleiden valmistustavasta johtuen myös muut mitat poikkesivat standardin määrittelemistä toleransseista. Palat valmistettiin leikkaamalla ne vannesahalla levystä. Standardista poikkeavista mitoista huolimatta ovat nämäkin testikappaleet vertailukelpoisia keskenään, koska ne olivat riittävällä tarkkuudella samankokoisia.

Erilaisista geometrioista ei aiheutunut tuloksiin suurta eroa, koska murtumisvoima suhteutettiin kunkin kappaleen liitospinta-alaan. Adheesio- ja koheesiomurtumissa perusaineen kestävyyserot eivät aiheuta virhettä. Perusainemurtumassa puolestaan murtumisjännitys ei kerro liitoksen maksimilujuutta.

5.2 Testikappaleiden liimaus

Liimaukset suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoulun, Hernesaassa sijaitsevan projektihallin maalausammiossa liimausolosuhteiden vakioimiseksi. Liimaus ja liima-aineen kovettuminen tapahtui 21 °C:n lämpötilassa. Liimojen annettiin kovettua maalausammiossa 48–72 tuntia. Maalausammion yhteiskäytön vuoksi lämpötila oli hetkellisesti kovettumisen aikana 40–50 °C. Kohotettu lämpötila nopeuttaa liiman kovettumisprosessia. Liima-aineen täyden lujuuden saavuttamiseen tarvittava kovettumisaika vaihtelee 12 tunnista 72 tuntiin, liima-aineesta ja kovettumislämpötilasta riippuen. Myös kovettumisajat on ilmoitettu valmistajan teknisissä tiedotteissa liitteissä 2–7.

Ennen liimausta kaikki liimattavat pinnat puhdistettiin liuottimella liasta ja rasvasta. Osaan pinnoista tehtiin myös vertailun vuoksi mekaaninen karhennus ja osaan levitettiin ennen liima-ainetta valmistajan suosittelemaa pohjustusainetta. Mekaaninen karhennus suoritettiin hiomalla pinta hiomapaperilla P80. Esikäsitteilytoimenpiteet ja liimaussarjakoot eri liittämismenetelmille on esitetty taulukossa 5. Liima-aineiden valmistajien teknisten tiedotteiden mukaan ohut sauma on lujin, joten liimauksissa sauma pidettiin mahdollisimman ohuena. Juoksevissa liimoissa sauman paksuutta kontrolloivat liima-aineen sisältämät partikkelit ja liimakalvoissa kalvon paksuus.

Tarvittavan puristuksen aikaansaamiseksi käytettiin keskimäärin 6,43 kg:n painoja. Tarkoituksena oli käyttää samankaltaisia painoja kuvan 33 mukaisesti, jotta myös

puristusvoima olisi vakio. Painoja käytettiin kaikissa liitoksissa lukuun ottamatta kuumaliimaa. Kuumaliima ei vaadi puristusta, sillä se muodostaa lähes välittömästi riittävän lujuuden itsessään. Limiliitos pyrittiin tekemään standardin ISO 4587 mukaisesti 12,5 mm:n pituudelta.



Kuva 33. Testikappaleet liimauksessa

Liiman kovettuttua testikappaleiden pituus, paksuus ja leveys mitattiin. Paksuus ja leveys mitattiin molemmista päistä sekä liitoksen kohdalta. Eroavaisuuksia ja liitoksesta pursunnutta ylimääräistä liima-ainetta pyrittiin tasoittamaan hiomalla liitetyjä testikappaleita suoraa tasoa vasten. Näistä syistä koekappaleiden mitoissa esiintyi vaihtelua. Sen vaikutus pyrittiin kuitenkin minimoimaan laskemalla jokaisen testikappaleen liitospinta-ala erikseen, jolloin veto-leikkausjännityksen arvo on paikkansa pitävä.

5.3 Veto-leikkauslujuuskokeet

Materiaalitutkimukset suoritettiin Metropolian Kalevankadun toimipisteessä materiaalitekniikan laboratoriossa. Valmistellut testikappaleet tuotiin standardia ISO 291 mukailleen mittalaitteen kanssa samaan lämpötilaan ja ilmankosteuteen ennen testausta. Veto-leikkauslujuuskokeet suoritettiin Zwick Z010 -mittauslaitteella.

Mitattaviksi suureiksi kokeissa valittiin maksimi- sekä murtumisvoima. Mittalaite mittaa voimaa newtoneina, mutta syöttämällä liimauspinta-alan mittalaitteen ohjelmistoon, saatiin tulokseksi suoraan veto-leikkauslujuuden arvo limiliitoksessa. Ekstensiometrin puuttuessa kappaleiden venymää ei voitu luotettavasti mitata. Koska mittalaitteen kiinnitysleukojen keskilinjaa ei voida säätää, aiheutuu kiinnitysmenetelmästä johtuen limiliitokseen taivutusmomenttia. Tämä pyrittiin estämään käyttämällä kuvan 34 mukaisia välilevyjä kiinnitysleuoissa. Testisarjoissa, joissa vetävä voima kasvoi suureksi, aiheutui välilevyistä testikappaleen kiinnityksen luistamista. Tästä syystä niitä ei voitu jokaisessa testisarjassa käyttää. Välilevyjen käyttämättä jättäminen tai kiinnityksen luistaminen ei kuitenkaan aiheuttanut merkittäviä muutoksia veto-leikkauslujuuden arvoihin.



Kuva 34. Veto-leikkausjännityskoe

Mittaus suoritettiin vakiovoimatestinä, jolloin jokaista testikappaletta kuormitti 10 kN:n voima. Leikkausjännitys asetettiin nousemaan standardin mukaisesti 8,3 MPa minuutissa. Kokeissa olleet materiaalit (vaakarivi), liima-aineet (pystyrivi) sekä testikappalemäärät on esitetty taulukossa 5. Taulukossa GP tarkoittaa tutkittavan

materiaalin yleiskäyttöön soveltuvaa versiota, jonka perässä oleva numero viittaa taas selluloosakuitujen prosenttimäärään. PE viittaa polyeteenilevyistä valmistettuihin testikappaleisiin. Liima-aineen nimen perässä on myös testikappaleista mitattu keskimääräinen sauman paksuus millimetreissä. Sulkeissa oleva arvo on valmistajan ilmoittama ohuin luotettavan liitoksen takaava sauman paksuus. Luvun 3.1.1 ja liima-aineiden teknisten tiedotteiden perusteella ero paksuudessa alentaa liitoksen leikkausjännitystä, jolloin saadussa tuloksessa taivutuksen osuus kasvaa. Nämä saattavat aiheuttaa pientä poikkeamaa tuloksiin, mutta saavutettu sauman paksuus on kuitenkin suhteellisen lähellä valmistajan ilmoittamaa arvoa. Vaihtelevat testikoot ja tyhjät kohdat taulukossa johtuvat testikappaleiden rajallisesta määrästä. Sarjakokona pyrittiin käyttämään standardin 4587 mukaista, vähintään viiden kappaleen sarjakokoa luotettavien tulosten saamiseksi.

Taulukko 5. Tutkittavat materiaalit ja liittämismenetelmät

	GP20	GP30	GP40	GP50	PE _{musta}	PE _{valkoinen}
3M DP-8005 karhennettu	5	5	-	5	-	5
Loctite 3038 karhennettu	5	5	-	5	-	5
Loctite 4090 karhennettu	5	5	-	5	-	5
3M DP-8005, 0,28 (0,20)	5	5	5	5	5	5
Loctite 3038, 0,33 (0,25)	5	5	5	5	5	5
Loctite 4090, 0,29 (-)	5	5	5	5	5	5
Liimakalvo 9088, 0,25 (0,21)	5	5	5	5	5	5
Liimakalvo 6406LSE, 0,62 (0,64)	5	5	5	5	5	5
Kuumaliima 3731, 0,62	5	5	5	5	5	5
Liimakalvo 9088 karhennettu	-	-	-	-	-	3
Liimakalvo 6406LSE karhennettu	3	3	-	3	-	3
Kuumaliima 3731 karhennettu	3	3	3	3	3	3
Ultraäänihitsaus	6	6	6	6	-	-

5.4 Tulokset

Testisarjojen tulokset on esitetty taulukossa 6. Taulukkoon on kirjattu sarjojen keskimääräiset veto-leikkausjännitysten arvot murtumishetkellä (MPa), sekä sarjoissa esiintyneet murtumatyypit, joissa PAM tarkoittaa perusainemurtumaa, A adheesiomurtumaa ja K koheesiomurtumaa. Samassa sarjassa esiintyneet eri murtumatyypit on eritelty vinoviivalla. Murtumatyyppin ollessa useamman eri murtuman yhdistelmä, on eri osatekijät yhdistetty plusmerkillä. Sulkeissa oleva numero on sarjan tunnistenumero. Yleisesti ottaen taulukon tulokset vaikuttavat luotettavilta ja pääsääntöisesti yhteneväsiltä. Samoilla liittämiskäytännöillä saavutetut tulokset ovat samassa suuruusluokassa keskenään ja eroavaisuudet ovat loogisia sekä perusteltavissa.

Taulukkoa 6 tarkentaa liite 8, jossa samat tulokset on esitetty graafisesti. Liitteen pylväsdiagrammeissa on keskiarvon lisäksi esitetty myös sarjojen vaihteluvälit, eli suurimman ja pienimmän sarjassa esiintyneen arvon poikkeama keskiarvosta.

Taulukko 6. Veto-leikkausjännityskokeiden tulokset

	GP20	GP30	GP40	GP50	PE _{musta}	PE _{valkoinen}
3M DP-8005 karhennettu	4,22 PAM (1)	5,55 PAM (2)	-	5,81 PAM (3)	-	3,39 PAM / A+K (4)
Loctite 3038 karhennettu	3,31 A / K (5)	4,15 K (6)	-	4,55 PAM (7)	-	3,25 PAM+A+K / A+K (8)
Loctite 4090 karhennettu	3,41 A / A+K (9)	3,72 A / A+K (10)	-	3,83 A+K (11)	-	2,98 A / A+K (12)
3M DP-8005	4,21 PAM (13)	5,28 PAM (14)	6,61 PAM (15)	6,31 PAM (16)	3,37 PAM (17)	3,68 PAM (18)
Loctite 3038	4,02 PAM (19)	5,17 PAM (20)	5,48 PAM (21)	5,44 PAM+A (22)	3,13 PAM (23)	3,09 PAM (24)
Loctite 4090	0,96 A / A+K (25)	1,26 A / A+K (26)	1,62 A / A+K (27)	1,69 A / A+K (28)	1,78 A / A+K (29)	1,78 A / A+K (30)
Liimakalvo 9088	0,16 A (31)	0,22 A (32)	0,14 A (33)	0,12 A (34)	0,20 A (35)	0,67 A (36)
Liimakalvo 6406LSE	0,45 A (37)	0,40 A (38)	0,38 A (39)	0,49 A (40)	0,34 A (41)	0,31 A (42)
Kuumaliima 3731	0,97 A+K (43)	1,09 A+K (44)	1,38 A+K (45)	1,48 A+K (46)	2,01 A / A+K (47)	2,11 A (48)
Liimakalvo 9088 karhennettu	-	-	-	-	-	0,42 A (52)
Liimakalvo 6406LSE karhennettu	0,42 A (53)	0,50 A (54)	-	0,38 A (55)	-	0,35 A (56)
Kuumaliima 3731 karhennettu	2,01 A / A+K (57)	1,47 A+K (58)	1,56 A+K (59)	1,58 A+K (60)	2,00 A+K (61)	1,75 A / A+K (62)
Ultraäänihitsaus	1,35 (63)	1,43 (64)	1,86 (65)	2,06 (66)	-	-

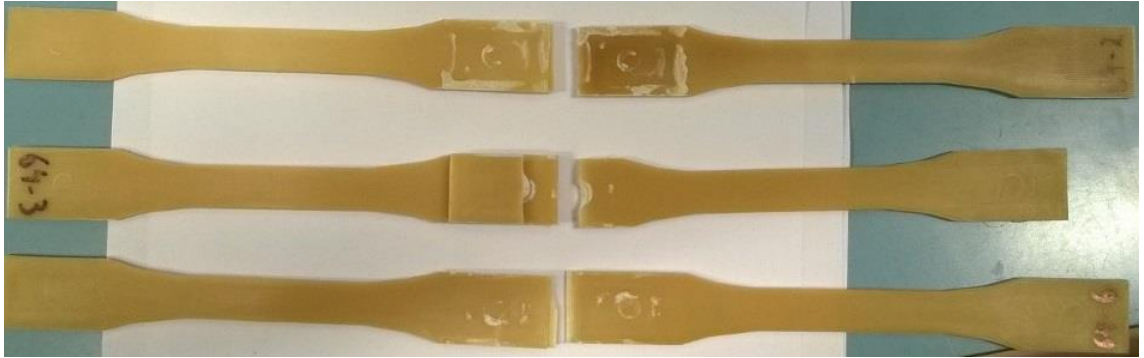
Tuloksista vertailukelpoisimpia standardiin ISO 4587 nähden ovat valkoisesta polyeteenilevystä valmistettujen kappaleiden liitokset. Taulukon tuloksissa on huomioitava perusainemurtuman kohdalla, että tämä on veto-leikkausjännityksen arvo liitoskohdassa kappaleen murtuessa. Se ei siis vastaa kappaleen murtumisjännitystä, koska se on laskettu eri pinta-alaa käyttäen.

Tulosten perusteella 3M DP-8005 -liima osoittautui kestäväksi ja muodostavan hyvän adheesion kappaleen pintaan, sillä jokaisessa testikappaleessa liimasauma kesti

perusaineen murtuessa. Loctite 3038 -liiman tapauksessa yleisin murtumatyyppi oli myös perusainemurtuma, lukuun ottamatta sarjoja viisi ja kuusi, joissa murtuma oli tyypiltään adheesio- tai koheesiomurtuma. Näiden sarjojen liimausvaiheessa on kappaleiden yhteenpuristus saattanut olla puutteellinen, koska tulokset ovat heikkoja muihin verrattuna. Loctite 4090 -liiman murtumatyypit olivat yhteneväisiä, joko adheesio- tai adheesio-koheesiomurtumia. Liima-aine osoittautui muodostavan valmistajan ilmoittamaa huomattavasti suuremman lujuuden liitoksessa (valmistajan mukaan: PP 0,6 MPa ja PE 0,5 MPa).

Liimakalvoja 9088 ja 6406LSE käytettäessä olivat tulokset pääsääntöisesti yhtenäisiä, vaikkakin joissain sarjoissa esiintyi hajontaa. Tämäkin hajonta saattoi johtua epätasaisesta puristusaineesta liimausvaiheessa. Kaikissa sarjoissa murtumatyyppinä oli kuitenkin adheesiomurtuma. Kuumaliiman 3731 tulokset olivat testisarjojen sisällä suhteellisen yhteneväisiä. Suurimassa osassa kappaleista murtuma oli adheesio- ja koheesiomurtuman yhdistelmä. Murtumislujuudet ovat kuitenkin valmistajan ilmoittamia pienempiä (valmistajan mukaan: PP 3,8 MPa ja PE 2,9 MPa).

Ultraäänihitsatuissa kappaleissa esiintyi paljon vaihtelua testisarjojen sisällä. Tulokset jäivät myös selvästi perusaineen murtolujuuden alapuolelle. Tähän vaikutti todennäköisesti yleisesti ultraäänihitsauksessa käytettävän energianohjaimen puuttuminen. Ilman sitä hitsautuminen tapahtuu suoraan tasopinnalle, mikä heikentää sauman lujuutta. Tämä on huomattavissa kuvasta 35, jossa näkyy hitsausauman onnistuneen vain osittain. Tämä taas aiheuttaa virhettä myös murtumisjäännityksen arvoon, sillä se on laskettu olettaen liitoksen onnistuneen koko liitospinta-alalta. Lujitekuitujen suuntautumisen muokkautumisella hitsausprosessin yhteydessä voi olla myös vaikutusta. Kaikki polypropeenipohjaiset laadut, kuitupitoisuudesta riippumatta, olivat kuitenkin mahdollisia hitsata.

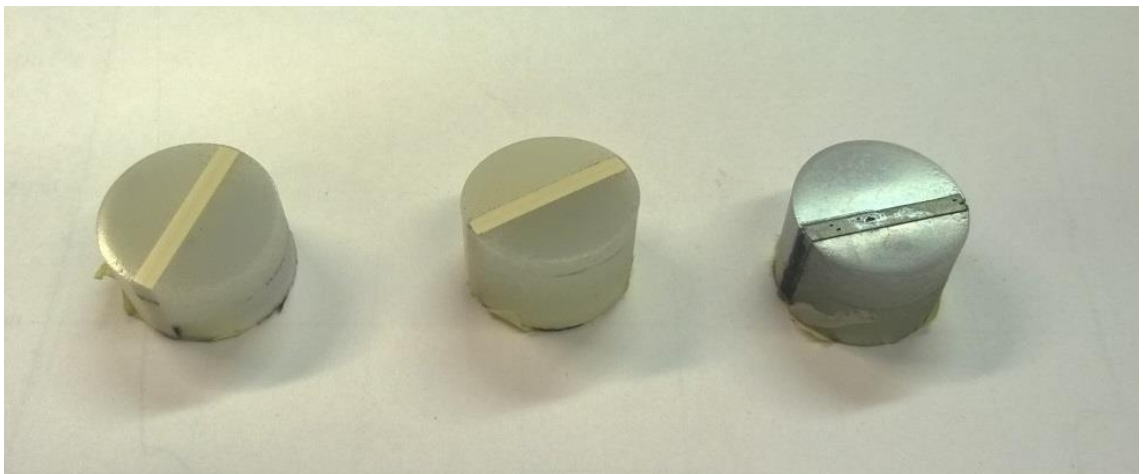


Kuva 35. Ultraäänihitsausauma vetokokeen jälkeen

5.5 Mikroskooppitarkastelut

Sarjoista 8, 12, 29 ja 30 valittiin kappaleet mikroskooppitarkastelua varten. Näissä kappaleissa murtumatyyppi oli ahdeesio-koheesiomurtuma ja pyrkimyksenä oli selvittää, näkyykö rajapinnassa mikroskoopilla tarkasteltaessa syytä liitoksen pettämiselle.

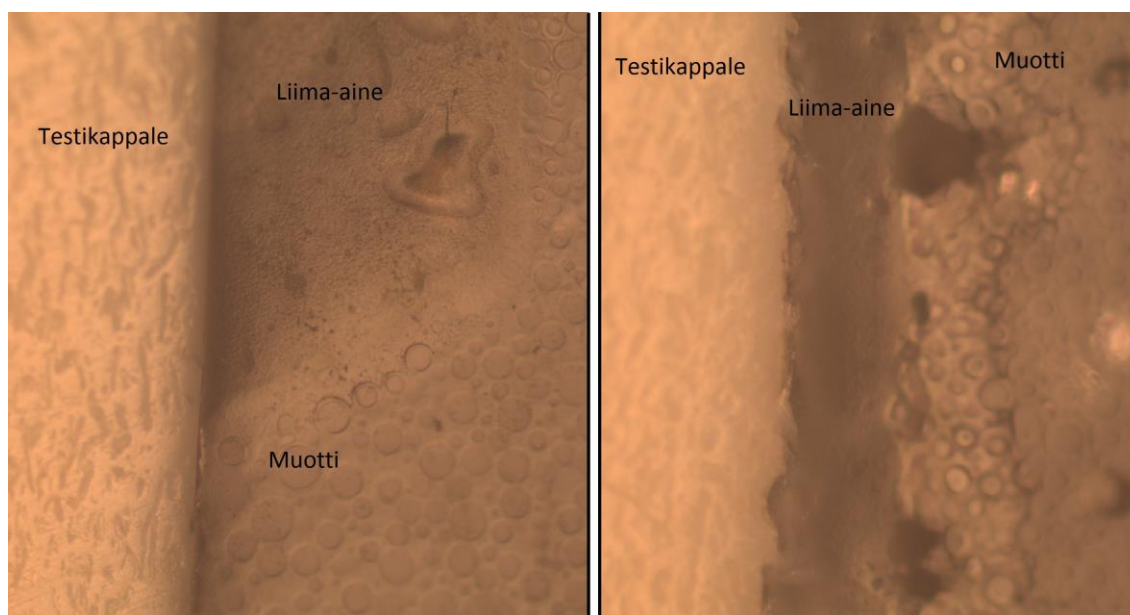
Testikappaleet valettiin akryyliin näytteen valmistelujen helpottamiseksi (kuva 36). Tämän jälkeen tarkasteltava pinta hiottiin ja kiillotettiin tähän tarkoitettuun Tegramin 25 -näytteenvalmistusjärjestelmällä.



Kuva 36. Hiotut ja kiillotetut näytepalat

Näytteiden rajapintaa tutkittiin Leica DM 2500M -materiaalianalyysimikroskoopilla. Tämä ei kuitenkaan tuonut varsinaista lisäinformaatiota adheesio- ja

koheesiomurtumiin johtaneista syistä. Mikroskooppikuva havainnollisti kuitenkin hyvin mekaanisen karhennuksen vaikutusta liima-liitoksessa. Kuvassa 37 vasemmanpuolisessa kappaleessa liimapintaa ei ole karhennettu, joten pinta on suhteellisen tasainen. Oikeanpuoleisessa kuvassa taas näkyy selvästi karhennuksen testikappaleen pintaan aiheuttamat harjanteet ja syvänteet, jotka kasvattavat liimauspinta-alaa.



Kuva 37. Karhentamattoman ja karhennetun liimapinnan vertailu

5.6 Johtopäätökset

Taulukon 6 perusteella biokomposiittimuovin selluloosakuitupitoisuudella on vaikutusta liimaliitoksen kestävyteen. Sarjoissa 5–6, 9–11, 25–28, 43–46 sekä ultraäänihitsatuissa sarjoissa 63–66 veto-leikkauslujuusarvo nousi vaihtelevasti selluloosakuitupitoisuuden kasvaessa. Sarjoissa 25–28 ja 43–46 murtumisjännityksen ero oli prosentuaalisesti huomattava pienimmän ja suurimman selluloosakuitupitoisuuden välillä, eron ollessa sarjoissa 76 % ja 53 %. Liimaliitoksissa tähän oli todennäköisesti syynä pinnanlaatu, joka muuttui epätasaisemmaksi selluloosakuitupitoisuuden kasvaessa. Tällainen pinta mahdollistaa paremman adheesion liima-aineen ja liimapinnan välillä. Liitoksissa, joissa murtumatyyppinä ei ollut perusainemurtuma, ei esiintynyt suurta eroa tuloksissa eri matriisimuovien välillä. Polyeteenipohjaisten testikappaleiden tulokset olivat lähellä toisiaan sekä

polypropeenipohjaisten kappaleiden liitosten lujuusominaisuuksia. Sarjoja, joissa murtumatyyppinä on perusainemurtuma, ei voida vertailla keskenään, koska silloin vertailtaisiin perusaineen lujuutta eikä itse liimaliitosta.

Mekaanisen karhennuksen vaikutus näkyy kuumaliiman 3731 kohdalla, verrattaessa tuloksia karhentamattomissa sarjoissa 43–48 karhennettuihin sarjoihin 57–62. Karhennetuissa sarjoissa ei saavuteta suurempia maksimilujuusarvoja kuin karhentamattomissa, mutta lujuudet ovat keskimäärin suurempia. Sen sijaan selvemmin mekaanisen karhennuksen vaikutus näkyy Loctite 4090 -liimassa, verrattaessa sen karhentamattomia sarjoja 25–30 karhennettuihin sarjoihin 9–12. Näiden sarjojen välinen ero liiman murtumisljuuksissa on jopa 2,5-kertainen.

Liima-aineen valmistajan ilmoittamiin lujuusarvoihin on tuloksista mielekästä verrata valkoisesta polyeteenipohjaisesta levystä valmistettuja testikappaleita. Näiden mitat ovat lähellä myös valmistajien käyttämässä testausstandardissa ISO 4587 määritellyjä. Liima-aineiden 3M DP-8005 ja Loctite 3039 kohdalla valmistajan ilmoittamaa arvoa ei saavutettu perusaineen murtuessa ennen tätä. Molemmissa tapauksissa liitokset osoittautuivat siis kestäviksi. Loctite 4090 -liima puolestaan muodosti huomattavasti valmistajan ilmoittamaa suuremman veto-leikkausjännityksen liitoksessa, sarjan 30 keskimääräisen murtumisjännityksen ollessa 1,78 MPa. Valmistajan ilmoittama arvo polyeteenin liitoksille on 0,5 MPa. Valmistaja ei liima-aineen teknisissä tiedoissa ilmoita, onko testeissä käytetty sen kyseiselle liima-aineelle suosittelemaa pohjustusainetta. Tämän puuttuminen selittäisi eroavaisuudet tuloksissa. Kuumaliiman 3731 tapauksessa sarjan 48 testeissä mitattu keskimääräinen murtumisjännitys liitoksessa puolestaan oli 2,11 MPa, kun valmistajan ilmoittama arvo on 2,9 MPa. Liimakalvojen kohdalla saadut tulokset eivät olleet vertailukelpoisia liimakalvojen teknisissä tiedotteissa ilmoitettuihin, valmistajan käyttäessä eri standardin testausmenetelmiä. Tulosten perusteella akryylivaahoteipillä 6406LSE on mahdollista saavuttaa lujuusominaisuuksiltaan parempi liitos kuin liimakalvolla 9088.

Tulosten perusteella nestemäisillä liima-aineilla saavutettiin suurimmat liitoksen lujuusominaisuudet. Kuumaliimalla ei vastaavaa rakenteellista lujuutta saumassa saavutettu. Liimakalvoilla muodostetun sauman lujuusominaisuudet olivat heikoimpia. Testeissä tutkittujen ultraäänihitsausaumojen lujuudet vastasivat kuumaliiman lujuusominaisuuksia, mutta kuten luvussa 5.4 todettiin, aiheutuu sauman epätasaisuudesta virhettä liitospinta-alan vaihtelevuuden kautta myös saatuihin

murtumisjännityksiin. Ultraäänihitsattavat kappaleet vaativat energianohjaimen tasaisen sauman varmistamiseksi, jolloin myös tulokset olisivat vertailukelpoisia liitoksen tapahtuessa koko liitospinta-alalta. Ultraäänihitsaamalla on kuitenkin mahdollista saavuttaa perusaineen lujuus saumassa. Tämä edellyttää kuitenkin hitsausprosessin huomioimista kappaleen geometriassa jo suunnitteluvaiheessa.

6 Yhteenveto

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Metropolia Ammattikorkeakoulun Biofore-konseptiautoprojektia. Kyseessä on laaja, eri alojen opiskelijoita yhdistävä konseptiauton valmistusprosessi. Vuonna 2010 alkaneen hankkeen tarkoituksena oli opiskelijapainotteisesti suunnitella ja valmistaa ympäristöystävällisiä materiaaleja hyödyntäen kaupunkiolosuhteisiin soveltuva konseptiauto. Valmis auto esiteltiin Geneven kansainvälisessä autonäyttelyssä maaliskuussa 2014.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on teoriapohjaisesti käsitellä erästä käytössä olleista ympäristöystävällisistä materiaaleista. Työssä käydään kyseisen biokomposiittimuovin rakenne läpi pääpiirteittäin sekä perehdytään sen yhteydessä käytettäviin valmistusmenetelmiin. Pääpaino tässä opinnäytetyössä kuitenkin on tämän materiaalin liittämismahdollisuuksissa. Työ käsittelee erityisesti liimaliitoksia ja näiden haastavuutta kyseisen materiaalin tapauksessa. Näitä asioita käsitellään teoriapohjaisesti sekä suoritetaan myös käytännön testejä eri liitosmenetelmien tutkimiseksi. Testausmenettelyssä sekä testikappaleiden valmistuksessa, pyrittiin mahdollisimman paljon hyödyntämään Metropolian sekä yhteistyökumppaneiden laitteistoa.

Liima-aineiden testausmenettelyjen tulokset olivat riittävän yhteneväisiä päätelmien tekemiseen, joten työssä asetetut tavoitteet saavutettiin. Tuloksena löydettiin toimivia liitosratkaisuja kyseiselle materiaalille ja testitulosten perusteella eri ratkaisuista voidaan valita tilanteeseen soveltuva vaihtoehto. Huomioitavaa on, että tämä opinnäytetyö ei ota kantaa siihen, mikä on tilanteeseen sopivin liitosratkaisu. Tutkittavana olleesta materiaalista on mahdollista valmistaa todella laajalla skaalalla erimuotoisia ja -kokoisia osia, ja tämän lisäksi soveltuvan liitosmenetelmän valintaan vaikuttaa moni asia, kuten esimerkiksi sarjakoko, kappaleen geometria ja vaadittu

liitoksen lujuus. Tässä työssä esitellään ainoastaan erilaisia menetelmiä materiaalin liittämiseksi ja niillä saavutetut tulokset standardia mukailevassa testausmenettelyssä.

Tätä työtä voidaan käyttää tukena tehtäessä valintoja kyseisen biokomposiittimuovin liittämismenetelmien suhteen. Lisäksi työn teoriaosuus esittelee erilaisia liitosmahdollisuuksia ja näiden ominaisuuksia sekä liitoksen suunnitteluperusteita.

Lähteet

- 1 UPM Formi –tuote-esite. 2012. Verkkodokumentti. UPM.
<http://www.upm.com/formi/Lists/Brochures/Attachments/4/UPM_Formi4-s_FI_0912_35632.pdf> Luettu 31.10.2013.
- 2 UPM Formi technical specification datasheet. 2013. Verkkodokumentti. UPM.
<http://www.upm.com/formi/Lists/Brochures/Attachments/5/UPM_Formi_GP_EN_0713.pdf> Luettu 31.10.2013.
- 3 Impact strength. Verkkodokumentti. Ensinger GmbH. <<http://www.ensinger-online.com/en/technical-information/properties-of-plastics/mechanical-properties/impact-strength>> Luettu 31.10.2013.
- 4 Elongation at break. Verkkodokumentti. Ensinger GmbH. <<http://www.ensinger-online.com/en/technical-information/properties-of-plastics/mechanical-properties/elongation-at-break/>> Luettu 31.10.2013.
- 5 Airasmaa, Ilkka, Kokko, Juha, Komppa, Veikko & Saarela, Olli. 1991. Muovikomposiitit. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- 6 Saarela, Olli, Airasmaa, Ilkka, Kokko, Juha, Skrifvars Mikael & Komppa Veikko. 2003. Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys ry.
- 7 Seppälä, Jukka. 2008. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto.
- 8 Antila, Anna-Maija, Karppinen, Maarit, Leskelä, Markku, Mölsä, Heini & Pohjakallio, Maija. 2009. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita.
- 9 Höök, Tuula. Polymeerimateriaalit. Verkkodokumentti.
<http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/mould_injmoulding_materials_FI.pdf> Luettu 4.11.2013.
- 10 Koleva, Milena. Käännös: Nykänen, Sanna. Polypropeeni. Verkkodokumentti.
<http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FI.pdf> Luettu 4.11.2013.
- 11 Koleva, Milena. Käännös: Nykänen, Sanna. Polyeteeni. Verkkodokumentti.
<http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf> Luettu 4.11.2013.
- 12 Wallenberger, Frederick T. & Weston, Norman. 2004. Natural Fibers, Plastics and Composites. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- 13 Misra, Manjusri, Mohanty, Amar K. & Drzal, Lawrence T. 2005. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.

- 14 Selluloosan rakenne ja ominaisuudet. Verkkodokumentti. TKK.
<<http://puukemia.tkk.fi/fi/opinnot/kurssit/19-1000/luennot/L7.pdf>> Luettu 12.11.2013.
- 15 UPM Formi. Verkkodokumentti. UPM.
<<http://www.upm.com/formi/Pages/Default.aspx>> Luettu 23.10.2013.
- 16 Extruder. Verkkodokumentti. R&B Plastics Machinery LLC.
<<http://www.rbplasticsmachinery.com/plastics-extruders/images/grooved-feed-extruder-28.jpg>> Luettu 7.11.2013.
- 17 Öchsner, Andreas, Adams, Robert D. & da Silva, Lucas F. M. 2011. Handbook of Adhesion Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 18 Pennala, Erkki. 1990. Lujuusopin perusteet. Espoo: Otatieto.
- 19 Ahopelto, Erkki, Brander, Timo, Holm, Gunnar, Manner, Tapio & Vanhatalo, Jaakko. 1992. Muovikomposiittien liitostekniikka. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.
- 20 Karhunen, Jouko, Lassila, Veikko, Pyy, Seppo, Ranta, Aarno, Räsänen, Satu, Saikkonen, Matti & Suosara, Eero. 1999. Lujuusoppi. Espoo: Otatieto.
- 21 Pocius, Alphonsus V. 1997. Adhesion and adhesives technology. New York: Hanser.
- 22 Comyn, John. 1997. Adhesion science. Cambridge: Royal Society of Chemistry, Information Services.
- 23 Mortimer, Charles E. Käännös: Hakkarainen, Marjatta. 1997. Kemia. Helsinki: Opetushallitus.
- 24 Pizzi, A. & Mittal, K. L. 2003. Handbook of adhesive technology. New York: CRC Press, cop.
- 25 Matassa, Alex. 2011. Bonding Polyolefins. Verkkodokumentti.
<<http://www.plasticsengineering.org/industries/node/4652>> Luettu 3.12.2013.
- 26 Budinski, Kenneth G. & Budinski, Michael K. 2010. Engineering materials. Upper Saddle River, N. J. : Pearson.
- 27 Loctite 3038 Technical Data Sheet. 2010. Verkkodokumentti. Henkel Loctite.
<http://hybris.cms.henkel.com/medias/sys_master/8806933725214.pdf> Luettu 9.12.2013.

- 28 Loctite 4090 Technical Data Sheet. 2013. Verkkodokumentti. Henkel Loctite.
<<http://tds.henkel.com/tds5/docs/4090-EN.PDF>> Luettu 10.2.2014.
- 29 3M DP-8005 Technical Data. 2010. Verkkodokumentti. 3M.
<http://solutions.3m.com.au/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1317022385000&locale=en_AU&assetType=MMM_Image&assetId=1273695674731&blobAttribute=ImageFile> Luettu 9.12.2013.
- 30 3M Adhesive Tape 9088 Technical Data. 2007. Verkkodokumentti. 3M.
<http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtUmY_v5x_GevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=70070939957.pdf> Luettu 12.12.2013.
- 31 AFTC High Performance Tapes Product Information. 2010. Verkkodokumentti. AFTC.
<http://www.tme.eu/fi/Document/4f4069c716c962d3cca8efdfed9eabe6/AFTC_Industrial_64-serie_EN_201004.pdf> Luettu 12.12.2013.
- 32 3M Selection Guide. Verkkodokumentti. 3M.
<<http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=66666UgxGCuNyXTtMXfX4XfcEVtQEcuZgVs6EVs6E666666--&fn=8110822%20ConverterMarkets-LR.pdf>> Luettu 13.12.2013.
- 33 3M Jet-melt 3731 Technical Data. 2002. Verkkodokumentti. 3M.
<http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSufSevTsZxtU4xt1l8_SevUqevTSevTSevTSeSSSSSS--&fn=78690099763.PDF> Luettu 13.12.2013.
- 34 3M Jet-melt. Verkkodokumentti. Powerpak.
<http://www.powerpak.com.au/catalog/productimage/3m_3762_jetmelt_glue-img2386.jpg> Luettu 13.12.2013.
- 35 Rakkola, Päivi & Järvelä, Pentti. 2000. Muovien ultraäänihitsaus. Tutkimusraportti. Muovitekniikka, Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Liimausohje

Tämä ohje on tehty perustuen polyolefiinipohjaisten muovien liittämiseen, mutta sitä voidaan soveltaa myös muille materiaaleille.

1. Valitse liitettäville kappaleille soveltuva liima-aine.
2. Varaa liimausprosessiin tarvittavat työvälineet lähelle. Jotkut liimat kovettuvat suhteellisen nopeasti, joten esimerkiksi puristimet ym tarvittavat työvälineet on hyvä olla lähettyvillä.
3. Kertaa liimausprosessi läpi vaihe vaiheelta, erityisesti muodoltaan hankalien tai vaikeassa paikassa olevien osien kohdalla. Liiman alkaessa kovettua, on liitosta usein hankala muokata.
4. Huolehdi oikeista työtilan lämpötilaolosuhteista sekä työturvallisuusvaatimuksista liiman valmistajan ohjeen mukaisesti.
5. Puhdista liimapinnat materiaalille soveltuvalla liuottimella. Tarvittaessa suorita myös muita liimapinnan esikäsittelytoimenpiteitä.
6. Levitä liima-aine liimapinnoille valmistajan ohjeen mukaisesti (joko toiselle pinnalle tai molemmille).
7. Purista liimatut pinnat yhteen esimerkiksi puristimilla, niiteillä tai ruuveilla.
8. Huolehdi riittävästä kovettumisesta, ennen kuin liitosta kuormitetaan. Kovettumisajat löytyvät liima-aineen valmistajan ohjeesta.
9. Varmista liitoksen onnistuminen liiman kovettua.

3M DP-8005 -liiman tekniset tiedot

3M

Scotch-Weld™

Structural Plastic Adhesive

DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Technical Data**September, 2010**

Product Description 3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 is a two-part acrylic-based adhesive (10:1 ratio by volume) that can bond many low surface energy plastics, including many grades of polypropylene, polyethylene, and TPO's *without special surface preparation*.

Scotch-Weld Adhesive DP-8005 can replace screws, rivets, plastic welding, and two-step processes which include chemical etchants, priming or surface treatments in many applications.

Features

- Ability to Bond Dissimilar Substrates
- Ability to Structurally Bond Polyolefins
- Room Temperature Cure
- Excellent Water and Humidity Resistance
- Very Good Chemical Resistance
- One Step Process - No Pre-Treatment of the Substrates Needed
- Solvent-free Adhesive System
- Convenient Hand-Held Applicator System
- Available in Bulk

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

**Typical Uncured
Physical Properties**

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Product		3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005	
		Translucent	Black
Color	Base (B) Accelerator (A)	Amber White	Black White
Lbs./gal.	Base (B) Accelerator (A)	8-8.4 8.75-9.15	8-8.4 8.75-9.15
Viscosity (cPs.) ⁽¹⁾	Base (B) Accelerator (A)	17,000-30,000 35,000-55,000	15,000-30,000 35,000-55,000
Base Resin	Base (B) Accelerator (A)	Methacrylate Amine	Methacrylate Amine
Mix Ratio (B:A)	By Volume By Weight	10:1 9.16:1	10:1 9.16:1
Full Cure Time @ 73 °F (23 °C)		8-24 hrs.	
Time to Handling Strength (minimum of 50 psi shear at 73 °F/23 °C)		2-3 hrs.	
Work Life at 73 °F (23 °C)		2.5-3 min.	

(1) Viscosity obtained by Brookfield, DV-II, #7 Spindle, 20 rpm at 75 °F (24 °C).

The accelerator formula is common to both Scotch-Weld Adhesive DP-8005 Translucent and DP-8005 Black

**Typical Cured
Physical Properties**

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Product		Scotch-Weld Adhesive DP-8005	
		Translucent	Black
Color		Yellow	Black
Shore D Hardness (ASTM D-2240)		55	60
Mechanical Properties ⁽²⁾			
	Strain at Peak Load	5.3%	4.5%
	Stress at Peak Load (psi)	1889	1692
	Modulus at 1% Strain (psi)	85,669	58,782
Tg onset (°C) ⁽³⁾		33	
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C) ⁽³⁾			
	Below Tg	125	
	Above Tg	170	

(2) Mechanical properties obtained using a Sintech 5GL Mechanical Tester. Approximate dimensions of the test specimen was 1.5" x 0.5" x 0.3". Elongation was determined by crosshead displacement. The crosshead velocity was 0.5"/min.

(3) Tg and CTE determined by TMA -40°F to 249°F (-40°C to 120°C) at 10°F (5°C)/min. (after 2 heat cycles).

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
 DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Typical Performance Characteristics

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Overlap Shear Strength⁽⁴⁾, tested @ 73°F (23°C)

Product	3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005	
	Translucent	Black
Substrate	OLS (psi)	OLS (psi)
HDPE	1100 SF	1100 SF
PE	1075 SF	875 SF
PP	1100 SF	1150 SF
UHMWPE	750 SF	750 SF
LDPE	400 SF	400 SF
ABS	1525 SF	1575 SF
Polycarbonate	850 SF	1100 AF
Plexiglass (PMMA)	950 SF	1075 SF
PVC	2050 SF	1900 SF
HIPS	550 SF	575 SF
Green FRP	2475 CF	2500 CF
PTFE	250 AF	200 AF
Polystyrene	775 SF	750 SF
Glass (3/16" thick)	650 SF	525 SF
Gel Coat (3/16" thick)	1500 SF	1425 SF
Copper (1/16" thick)	2275 CF	2050 CF
Aluminum (1/16" thick)	2275 CF	2075 CF
Cold-Rolled Steel (1/32" thick)	2500 AF	2275 CF
304 Stainless Steel (1/32" thick)	2300 CF	1100 AF
HDPE/HDG	975 SF (HDPE)	850 MM
HDPE/Galvanealed	950 SF (HDPE)	1025 SF (HDPE)
HDPE/CRS (non-abraded CRS)	950 SF (HDPE)	1025 MM
Oily HDG	2150 CF	1225 MM

SF = Substrate Failure/Break/Yield

CF = Cohesive Failure

AF = Adhesive Failure

MM = Mixed (Mode of AF and CF)

(4) Overlap Shear Test Method: Overlap shear test for adhesion determined in accordance to ASTM D1002. Sample dimensions were 1" x 4" x 1/8" (unless other thicknesses indicated) with an overlap area of 1" x 1/2". Plastics and glass substrates were cleaned with isopropyl alcohol (IPA) wipes; metal substrates were abraded with 150-grit sandpaper and cleaned with methyl ethyl ketone (MEK) wipes. All bonds were allowed to cure for a minimum of 48 hours at 73°F (23°C) before tested. Data were collected using a Sintech 5GL Mechanical Tester with the 2000-lb or 5000-lb load cells. Test rate was 2"/min. for plastic bonds, and 0.1"/min. for metal and glass bonds at 73°F (23°C).

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Typical Performance Characteristics (continued) **Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

T-Peel Strength⁽⁵⁾, tested @ 73°F (23°C)

Product	3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005	
Substrate	Translucent	Black
HDPE	17 pli SF	9 C sh

SF = Substrate Failure/Break/Yield (5) Peel tests on 0.02" thick HDPE, 0.017" bondline thickness, 8" x 1" in T-peel mode at a rate of 2.0"/min.
C sh = Cohesive but shocky

Environmental & Chemical Exposure Test on HDPE⁽⁶⁾
All Exposure Times 14 Days Unless Otherwise Noted
All Temperatures are Room Temperature Unless Otherwise Noted

Product	Scotch-Weld Adhesive DP-80005	
	Translucent	Black
Condition	Overlap Shear (psi)	Overlap Shear (psi)
Control - no chemical exposure	1100 SF	1100 SF
160°F (71°C)/100% RH	950 MM	950 MM
160°F (71°C) Water Soak	975 CF	1000 SF
Room Temperature Salt Water Soak (5% by wt.)	1100 SF	975 SF
160°F (71°C)/100% RH Salt Water Soak (5% by wt.)	925 CF	925 CF
NaOH (10% by wt.)	1075 SF	1025 SF
HCl (16% by vol.)	1100 SF	1000 SF
Isopropyl Alcohol	950 SF	1000 SF
Antifreeze Coolant	1000 SF	1025 SF
Gasoline	325 CF	450 CF
Diesel Fuel	1050 SF	950 SF
Toluene	25 CF	50 CF
Acetone	100 CF	200 CF

SF = Substrate Failure/Break/Yield AF = Adhesive Failure (6) Environmental tests were conducted by immersing bonded coupons of HDPE and subsequent testing in accordance with footnote 4.
CF = Cohesive Failure MM = Mixed (Mode of AF and CF)

OLS Bond Strengths at Elevated Temperatures⁽⁷⁾

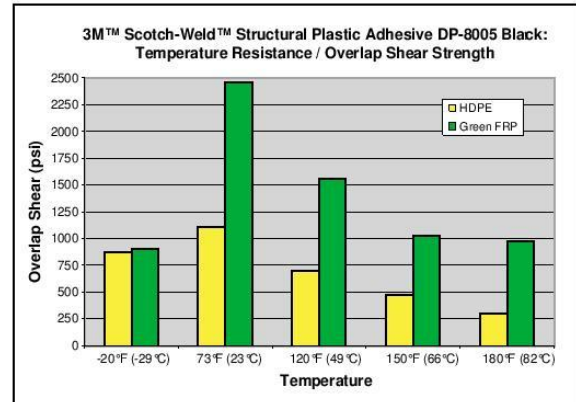
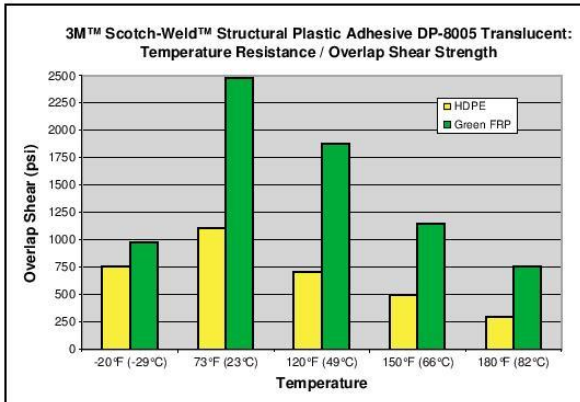
Product	Scotch-Weld Adhesive DP-8005			
	Test Temperature	Translucent (HDPE)	Black (HDPE)	Translucent (Green-FRP)
-20°F (-29°C)	750 CF	875 CF	975 AF	900 AF
73°F (23°C)	1100 SF	1100 SF	2475 AF	2450 AF
120°F (49°C)	700 CF	700 CF	1875 MM	1550 MM
150°F (66°C)	500 CF	475 MM	1150 MM	1025 MM
180°F (82°C)	300 CF	300 MM	750 MM	975 MM

OLS bond strength expressed in psi. (7) Temperature resistance tests were conducted at specified temperature in accordance with footnote 4.
SF = Substrate Failure/Break/Yield AF = Adhesive Failure
CF = Cohesive Failure MM = Mixed (Mode of AF and CF)

3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

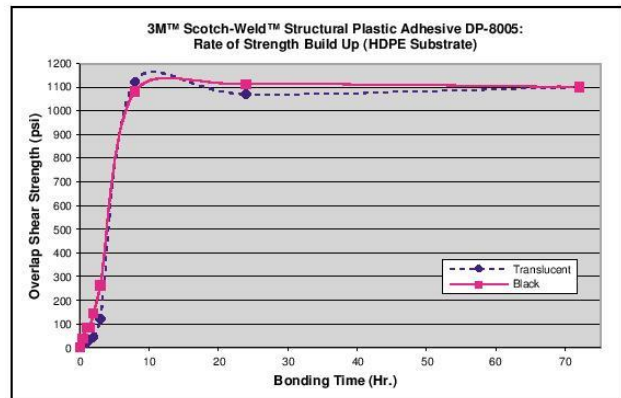
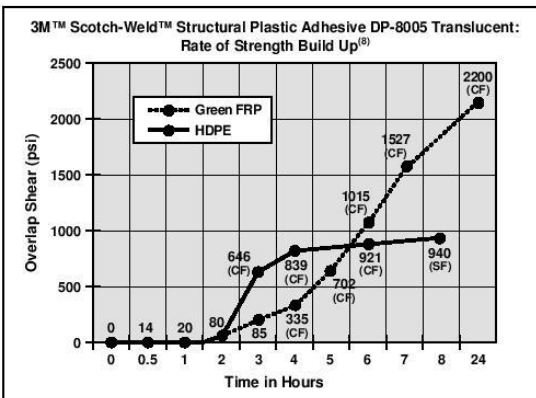
Temperature Resistance

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.



Typical Rate of Strength Build-Up⁽⁸⁾

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

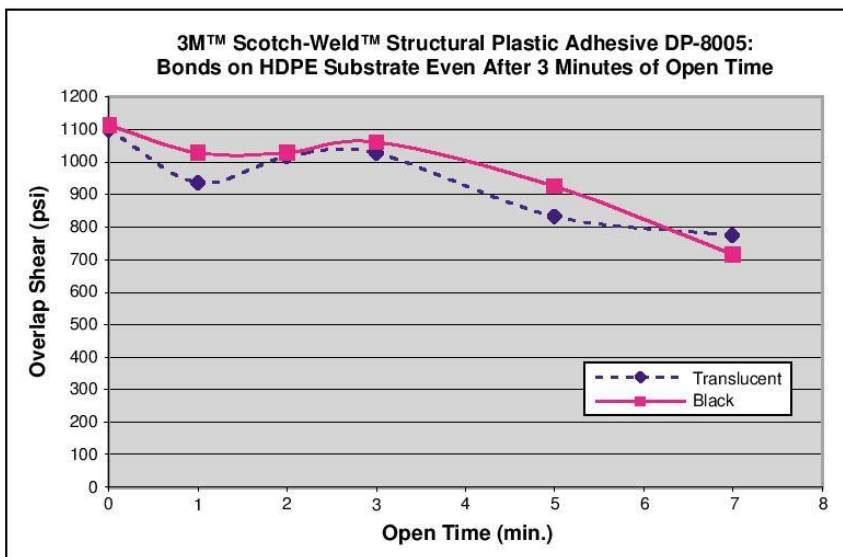


(8) Rate of strength testing done using overlap shear test described in footnote 4.

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Times and Substrates⁽⁹⁾

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.



(9) Open Time Overlap Shear Test done using test method described in footnote 4.

Suggested Substrates

Note: The following suggestions are based on laboratory tests on typical grades of the listed substrates. Because of the many combinations of process aids and additives that are used with plastic substrates, the user is responsible for determining whether 3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 is appropriate for a given application.

Potential Primary Surfaces	Polypropylene (PP) Polyethylene (PE, HDPE, LDPE)
Potential Secondary Surfaces	Fiber Reinforced Plastic (FRP) PVC Polycarbonate (PC) ABS Wood Acrylic (PMMA) Aluminum Polystyrene Glass Concrete Thermoplastic Elastomers (TPE) Metals
Not Recommended Surfaces Inconsistent results have been exhibited with substrates that contain oils and anti-stats.	PTFE Silicone Surfaces Surfaces Containing Mold-Release Agents Polyimide Nylons

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

**Handling/Curing
Information**

Directions for Use:

Important: Use only the specified 3M™ EPX™ Plus II Applicator system or appropriate meter mix equipment to ensure the proper 10:1 mix ratio and mix. Hand mixing is not recommended and may result in unpredictable results.

- 1) Apply adhesive to clean, dry substrates, which are free of loose paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and all other surface contaminants. See the Surface Preparation section for specific substrate preparation methods.

35 ml Cartridge:

Place duo-pak cartridge in EPX applicator. Remove cap. Remove rubber plug. Dispense and discard a small amount of adhesive to assure even ratio and free flow. Clear orifice if necessary. Use only orange 10:1 mixing nozzle by: (a) aligning nozzle notch with cartridge recess, and (b) twisting into place. Dispense and discard a small amount of adhesive through nozzle until the adhesive is mixed.

250 ml Cartridge:

While holding duo-pak cartridge in an upright position, remove and discard the insert from the cartridge by unscrewing plastic nut and removing metal washer. Place cartridge in a 10:1, 250 ml EPX applicator.

Clean orifice if clogged; dispense and discard a small amount of adhesive to even pistons. Attach orange 10:1 EPX mixing nozzle by:

- (a) sliding the nozzle over the cartridge orifice until the nozzle notch **aligns** and **seats** against the tab on the neck of the cartridge and;
- (b) screwing the plastic nut back onto the cartridge to secure the nozzle. Dispense and discard a small amount of adhesive until the mixed adhesive has a milky white appearance. If adhesive is clear, check the small orifice for debris or flow.

Meter-Mix Equipment:

Follow manufacturer's precautions, directions for use, and recommendations.

- 2) After the adhesive is applied, substrates must be mated within the worklife of the adhesive, 2-2.5 minutes or sooner for one-sided applications. Adhesive thickness less than .005" will yield unpredictable results. The joint design of the substrates should facilitate a .005" to .008" adhesive thickness at the bondline. Adhesive contains .008" microspheres for this purpose.
- 3) The bonded surfaces should be fixtured, or clamped, for at least 2 hours. The clamping pressure should be sufficient to keep the surfaces in contact during cure (typically 4-8 psi). Plastic parts can be designed to be self-fixturing, negating the need for external fixturing.

Note: Heating the bondline to 150-175°F (66-80°C) for 30 minutes will speed up curing. The parts should be dwelled for a minimum of 10 minutes at room temperature prior to heating to allow more adhesive penetration into the substrates before heat-accelerated cure.

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
 DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Handling/Curing Information (continued)

- 4) Cured adhesive appearance: the adhesive will yellow with time; a rippling effect in the adhesive as it cures is normal and indicates that the adhesive is mixed properly and curing normally.

Approximate Coverage – By Size of Container [Figures do not include nozzle waste]

Bead Size	Linear ft per 35 ml	Linear ft per 250 ml	Linear ft per mixed gallon
1/2"	1.8	12.9	196
3/8"	3	23	350
1/4"	7	51.8	785
1/8"	28.9	206.7	3,130
1/16"	114.8	820	12,240

Coverage in square feet – (.008" bond line) [Figures do not include nozzle waste]

Square ft per 35 ml	Square ft per 250 ml	Square ft per mixed gallon
2	13	200

Surface Preparation

3M™ Scotch-Weld™ Structural Plastic Adhesive DP-8005 can bond polypropylene, polyethylene and other thermoplastic polyolefins without special surface preparation. However, all substrates should be clean, dry and free of paint, oxide films, oils, dust, mold release agents and other surface contaminants. The amount of surface preparation directly depends on the bond strength and environmental resistance desired by the user.

The following cleaning methods are suggested for common surfaces.

Steel and Aluminum

- 1) Wipe free of dust with oil-free solvent such as acetone or isopropyl alcohol.
- 2) Sandblast or abrade using clean fine grit abrasives (150 grit or finer).
- 3) Wipe again with solvent to remove loose particles.
- 4) If a primer is used, it should be applied within 4 hours after surface preparation (or see instructions pertinent to a specific primer).

Note: Aluminum may also be acid etched. Follow the manufacturer's precautions and directions for this procedure.

Plastic/Rubber

- 1) Wipe with isopropyl alcohol.*
- 2) Abrade using fine grit abrasives (150 grit or finer).
- 3) Remove residue by wiping again with isopropyl alcohol.*
- 4) Allow solvent to evaporate before use.

***Note:** When using solvents, be sure to extinguish all ignition sources and follow the manufacturer's precautions and directions for use.

3M™ Scotch-Weld™
Structural Plastic Adhesive
 DP-8005 Translucent • DP-8005 Black

Surface Preparation (continued)	<p>Thermoplastic Polyolefin (TPO)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Wipe with isopropyl alcohol.* 2) Allow solvent to evaporate before use. <p>Glass</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Solvent wipe surface using acetone or isopropyl alcohol.* 2) Allow solvent to evaporate before use. <p>*Note: When using solvents, be sure to extinguish all ignition sources and follow the manufacturer's precautions and directions for use.</p>
Storage	For maximum shelf life, store duo-pak cartridges and bulk containers at 40°F (4°C) or below.
Shelf Life	When stored at the recommended temperatures in the original unopened containers, this product has a shelf life of six months from date of shipment.
Precautionary Information	Refer to Product Label and Material Safety Data Sheet for health and safety information before using this product. For additional health and safety information, call 1-800-364-3577 or (651) 737-6501.
Technical Information	The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that 3M believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed.
Product Use	Many factors beyond 3M's control and uniquely within user's knowledge and control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application. Given the variety of factors that can affect the use and performance of a 3M product, user is solely responsible for evaluating the 3M product and determining whether it is fit for a particular purpose and suitable for user's method of application.
Warranty, Limited Remedy, and Disclaimer	Unless an additional warranty is specifically stated on the applicable 3M product packaging or product literature, 3M warrants that each 3M product meets the applicable 3M product specification at the time 3M ships the product. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES OR CONDITIONS, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY OR CONDITION ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. If the 3M product does not conform to this warranty, then the sole and exclusive remedy is, at 3M's option, replacement of the 3M product or refund of the purchase price.
Limitation of Liability	Except where prohibited by law, 3M will not be liable for any loss or damage arising from the 3M product, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.

ISO 9001:2000

This Industrial Adhesives and Tapes Division product was manufactured under a 3M quality system registered to ISO 9001:2000 standards.

3M

Industrial Adhesives and Tapes Division

3M Center, Building 225-3S-06
 St. Paul, MN 55144-1000
 800-362-3550 • 877-369-2923 (Fax)
 www.3M.com/industrial



Recycled Paper
 40% pre-consumer
 10% post-consumer

3M and Scotch-Weld are trademarks of 3M Company.
 Printed in U.S.A.
 ©3M 2010 78-6900-9926-8 (9/10)

Loctite 3038 -liiman tekniset tiedot

Technical Data Sheet

LOCTITE®

LOCTITE® 3038™

February 2010

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® 3038™ provides the following product characteristics:

Technology	Acrylic
Chemical Type	Acrylic
Appearance (Part A)	Clearly yellow gel ^{LMS}
Appearance (Part B)	Viscous straw colored liquid ^{LMS}
Components	Two component- requires mixing
Viscosity	Medium, thixotropic
Cure	Two part acrylic
Mix Ratio, by volume- Part A: Part B	1 : 10
Application	Bonding
Specific Benefit	Bonds low energy plastic without pre-treatment

LOCTITE® 3038™ is designed primarily to bond e-coated metals (ECS) to glass fibre filled polypropylenes (PPGF) but can also be used on other low energy substrates such as LDPE and HDPE. The product is designed to work without surface pre-treatment. The product contains 0.25 mm fillers for bondline thickness control. The thixotropic nature of LOCTITE® 3038™ reduces the migration of liquid product after application to the substrate.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Part A:

Specific Gravity @ 20 °C	1.2
Viscosity, Cone & Plate, mPa·s (cP):	
Temperature: 25 °C, Shear Rate: 20 s ⁻¹	1,500 to 15,000 ^{LMS}
Color, APHA	1 to 3 ^{LMS}
Flash Point - See MSDS	

Part B:

Specific Gravity @ 25 °C	1.0
Viscosity, Cone & Plate, mPa·s (cP):	
Temperature: 25 °C, Shear Rate: 20 s ⁻¹	6,000 to 18,000 ^{LMS}
Flash Point - See MSDS	

TYPICAL CURING PERFORMANCE

This product cures when the components are dispensed through a static mixer at room temperature.

Fixture Time

Fixture time is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

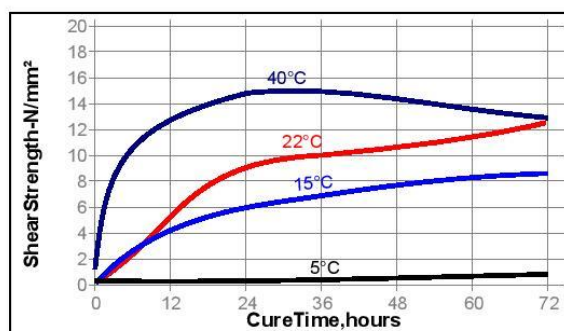
Fixture Time, mixed, minutes:	
PPGF to ECS	≤70

Open Time

Open Time, mixed, minutes	4
---------------------------	---

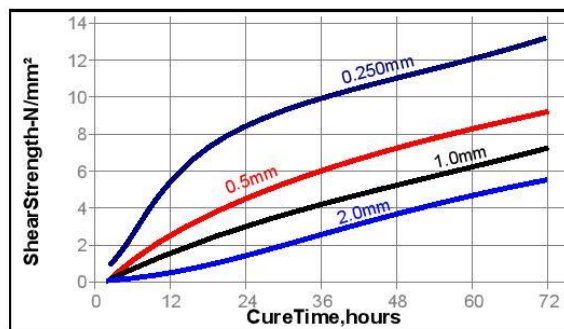
Cure Speed vs. Temperature

The graph below shows the shear strength developed with time on ECS to PPGF at different temperatures and tested according to ISO 4587.



Cure Speed vs. Bond Gap

The rate of cure will depend on the bondline gap. Thin bond lines result in higher cure speeds, increasing the bond gap will decrease the rate of cure.



TDS LOCTITE® 3038™, February 2010

TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 24hours @ 22 °C

Physical Properties:

Coefficient of Thermal Expansion, K ⁻¹ :	
Below Tg	178×10 ⁻⁶
Above Tg	145×10 ⁻⁶
Glass Transition Temperature, °C	57
Coefficient of Thermal Conductivity, W/(m·K)	0.436
Shore Hardness, ISO 868, DurometerD	65

Cured for 168hours @ 22 °C

Physical Properties:

Elongation, at break, ISO 527-2, %		37
Tensile Strength, at break, ISO 527-2	N/mm ² (psi)(12.98 1,880)
Tensile Modulus, ISO 527-2	N/mm ² (psi)(704 102,080)

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL**Adhesive Properties**

Cured for 72hours @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

PPGfto ECS	N/mm ² (psi)(≥8 ^{IMS} ≥1,160)
PPGfto Polycarbonate	N/mm ² (psi)(5.5 800)
Aluminum	N/mm ² (psi)(7.9 1,150)
PPGF	N/mm ² (psi)(9.8 1,420)
Polyamide(Nylon)	N/mm ² (psi)(2.9 420)
Polybutylene	N/mm ² (psi)(13.6 1,970)
Terephthalate (PBT)	N/mm ² (psi)(13.6 1,970)

Cured for 24hours @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

PPGF to ECS	N/mm ² (psi)(8.4 1,220)
-------------	-----------------------------	---------------

Cured for 168hours @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

PPGF to ECS	N/mm ² (psi)(10.5 1,520)
-------------	-----------------------------	----------------

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

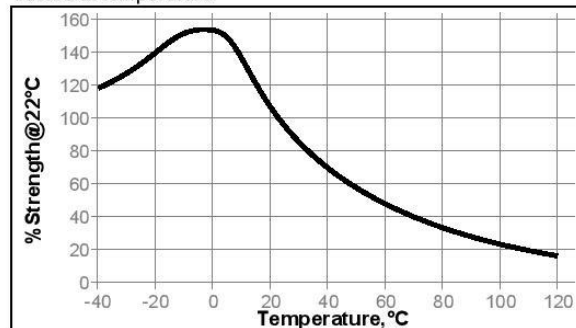
Cured for 24hours @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

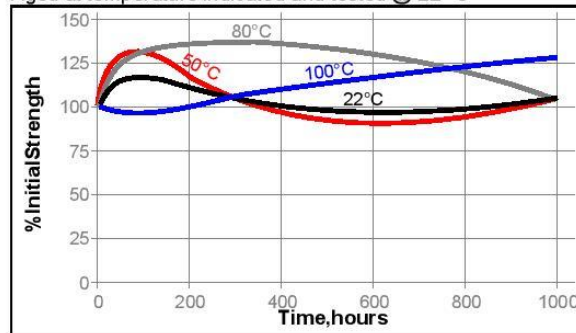
PPGF to ECS

Hot Strength

Tested at temperature

**Heat Aging**

Aged at temperature indicated and tested @ 22 °C

**Chemical/Solvent Resistance**

Aged under conditions indicated and tested @ 22 °C.

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	500 h	1000 h
98% RH	40	112	103	94
Motor oil	22	106	110	107
Motor oil	50	132	96	111
Water/glycol	22	114	102	99
Water/glycol	50	109	102	91

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).

Directions for use:

1. For best performance bond surfaces should be clean and free from grease.
2. For more detailed information, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Loctite Material Specification^{LMS}

LMS dated September 18, 2006 (Part A) and LMS dated September 26, 2007 (Part B). Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Loctite Quality.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return liquid to original container. Storage information may be indicated on the product container labeling. **Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties.** Henkel cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those recommended. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

(°C x 1.8) + 32 = °F
 kV/mm x 25.4 = V/mil
 mm / 25.4 = inches
 µm / 25.4 = mil
 N x 0.225 = lb
 N/mm x 5.71 = lb/in
 N/mm² x 145 = psi
 MPa x 145 = psi
 N·m x 8.851 = lb·in
 N·m x 0.738 = lb·ft
 N·mm x 0.142 = oz·in
 mPa·s = cP

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 0.4

Loctite 4090 -liiman tekniset tiedot

LOCTITE®

Technical Data Sheet

LOCTITE® 4090™

August 2013

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® 4090™ provides the following product characteristics:

Technology	Cyanoacrylate / Epoxy Hybrid
Chemical Type (Part A)	Cyanoacrylate
Chemical Type (Part B)	Epoxy
Appearance (Comp. A)	Transparent colorless to straw colored liquid ^{LMS}
Appearance (Comp. B)	Off-white to light yellow gel ^{LMS}
Appearance (Mixture)	Clear to slightly cloudy gel
Components	Two component- requires mixing
Mix Ratio, by volume- Part A: Part B	1 : 1
Viscosity	High
Cure	Room temperature cure after mixing
Application	Bonding

LOCTITE® 4090™ is a two component, general purpose adhesive which provides a very fast fixture at room temperature. It is designed to bond a variety of substrates including metals, most plastics and rubbers. LOCTITE® 4090™ provides good temperature and moisture resistance which also makes it suitable for applications in high temperature/humidity environments. The thixotropic nature makes it suitable for applications where good gap filling properties on rough and poorly fitting surfaces are required.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Part A:

Specific Gravity, g/cm ³	1.01
Viscosity, Cone & Plate, mPa·s (cP):	
Temperature: 25 °C	4,000 to 7,000 ^{LMS}
Flash Point - See MSDS	

Part B:

Specific Gravity, g/cm ³	1.06
Viscosity, Cone & Plate, mPa·s (cP):	
Temperature: 25 °C	25,000 to 40,000 ^{LMS}
Flash Point - See MSDS	

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Curing is initiated on mixing the Part A and Part B components. Handling strength is achieved rapidly; full strength is achieved over time.

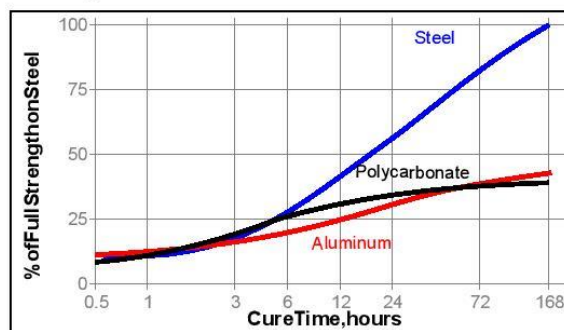
Fixture Time

Fixture time is defined as the time to develop a shear strength of 0.1 N/mm².

Fixture Time @ 25°C, seconds <180^{LMS}

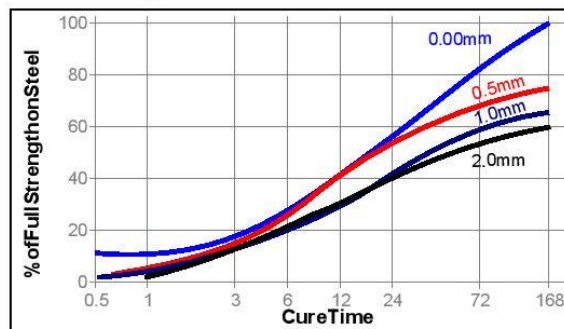
Cure Speed vs. Substrate

The rate of cure will depend on the substrate used. The graph below shows the shear strength developed with time on steel lap shears compared to different materials and tested according to ISO 4587.



Cure Speed vs. Bond Gap

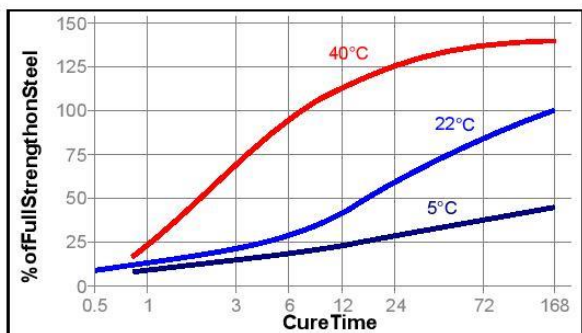
The rate of cure will depend on the bondline gap. The following graph shows the shear strength developed with time on grit blasted mild steel lap shears at different controlled gaps and tested according to ISO 4587.



Cure Speed vs. Temperature

The rate of cure will depend on the ambient temperature. The graph below shows the shear strength developed with time at different temperatures on grit blasted mild steel lap shears and tested according to ISO 4587.

TDS LOCTITE® 4090™, August 2013



TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

Cured for 1week @ 22 °C

Physical Properties:

Glass Transition Temperature ISO 11359-2, °C:

- Tg 1 88
- Tg 2 122

Coefficient of Thermal Expansion, ISO 11359-2 K⁻¹:

- Below Tg (88°C) 71×10⁻⁰⁶
- Above Tg (88°C) 175×10⁻⁰⁶
- Below Tg (122°C) 171×10⁻⁰⁶
- Above Tg (122°C) 158×10⁻⁰⁶

Shore Hardness, ISO 868, Durometer D 65 to 69

- Tensile Strength, at break, ISO 527-3 N/mm² 7.1
- (psi) (1,025)
- Tensile Modulus, ISO 527-3 N/mm² 565
- (psi) (81,800)

Elongation, at break, ISO 527-3, % 3.6

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL

Adhesive Properties

Cured for 168hours @ 22 °C

Shear Strength, Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)	N/mm ²	17
	(psi)	(2,420)
Aluminum	N/mm ²	7.6
	(psi)	(1,100)
Aluminum (etched)	N/mm ²	13
	(psi)	(1,900)
Zinc dichromate	N/mm ²	9.1
	(psi)	(1,320)
Stainless steel	N/mm ²	15
	(psi)	(2,120)
ABS	N/mm ²	5.2
	(psi)	(750)
Phenolic	N/mm ²	3.2
	(psi)	(460)
Polycarbonate	N/mm ²	6.9
	(psi)	(1,000)
Nitrile	N/mm ²	0.7
	(psi)	(100)
Wood (Oak)	N/mm ²	4.8
	(psi)	(700)
Epoxy	N/mm ²	9.1
	(psi)	(1,320)
Polyethylene	N/mm ²	0.5
	(psi)	(72)
Polypropylene	N/mm ²	0.6
	(psi)	(87)

TYPICAL ENVIRONMENTAL RESISTANCE

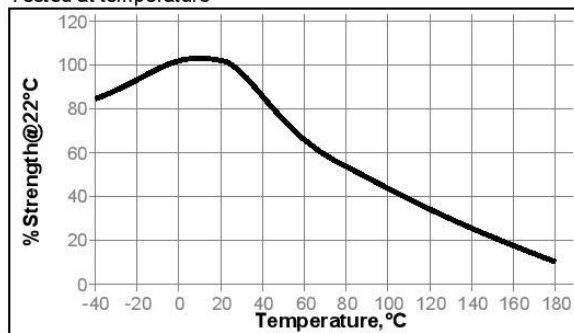
Cured for 1week @ 22 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

Steel (grit blasted)

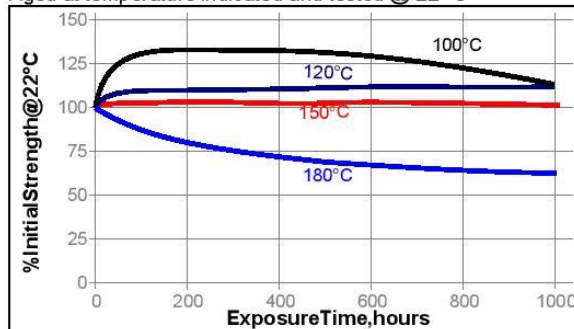
Hot Strength

Tested at temperature



Heat Aging

Aged at temperature indicated and tested @ 22 °C



Chemical/Solvent Resistance

Aged under conditions indicated and tested @ 22 °C.

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	500 h	1000 h
Water	22	90	75	70
Water	60	80	55	55
Motor oil	40	120	130	130
Unleaded gasoline	22	95	100	105
Ethanol	22	85	90	90
Isopropanol	22	100	100	95
Water/glycol 50/50	87	50	5	5
98% RH	40	85	70	70
95% RH	65	95	85	65

TDS LOCTITE® 4090™, August 2013

Lap Shear Strength, ISO 4587:
Polycarbonate

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	500 h	1000 h
98% RH	40	100	90	80

Lap Shear Strength, ISO 4587:
Aluminum

Environment	°C	% of initial strength		
		100 h	300 h	500 h
95% RH	65	100	95	85

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).

Where aqueous washing systems are used to clean the surfaces before bonding, it is important to check for compatibility of the washing solution with the adhesive. In some cases these aqueous washes can affect the cure and performance of the adhesive.

Directions for use:

1. Bond areas should be clean and free from grease. Clean all surfaces with a Loctite® cleaning solvent and allow to dry.
2. To use, Part A and Part B must be blended. Product can be applied directly from dual cartridge by dispensing through the mixer head supplied.
3. Insert the cartridge into the application gun and start the plunger into the cylinders using light pressure on the trigger. Next, remove the cartridge cap and expel a small amount of adhesive to be sure both sides are flowing evenly and freely. Attach the static mixing nozzle to the end of the cartridge and begin dispensing the adhesive. Purge and dispose of the first 3-8 cm from the end of the mix nozzle, as it may not be sufficiently mixed.
4. Apply the mixed adhesive to one of the bond surfaces to be joined. Parts should be assembled immediately after the mixed adhesive has been applied.
5. Bonds should be held fixed or clamped until adhesive has fixtured.
6. Keep assembled parts from moving during cure. The bond should be allowed to develop full strength before subjecting to any service load.

Loctite Material Specification^{LMS}

LMS dated May 27, 2013 (Part A) and LMS dated June 10, 2013 (Part B). Test reports for each batch are available for the indicated properties. LMS test reports include selected QC test parameters considered appropriate to specifications for customer use. Additionally, comprehensive controls are in place to assure product quality and consistency. Special customer specification requirements may be coordinated through Henkel Loctite Quality.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.

Optimal Storage: 2 °C to 8 °C. Storage below 2 °C or greater than 8 °C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

Disclaimer

Note:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS and Henkel France SA please additionally note the following:

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

Henkel Americas
+860.571.5100

Henkel Europe
+49.89.320800.1800

Henkel Asia Pacific
+86.21.2891.8859

For the most direct access to local sales and technical support visit: www.henkel.com/industrial

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada Corporation, the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 0.0

3M 9088 -liimakalvon tekniset tiedot

3M

High Performance Double Coated Tapes with Adhesive 375

9086 • 9087 • 9088 • 9088FL

Technical Data
March, 2007

Product Description 3M™ Double Coated Tapes with 3M™ Adhesive 375 provides a high level of adhesive peel and shear performance. The adhesive system used on these products provides good adhesion to both high and low surface energy substrates. The excellent initial tack ensures that a bond of good integrity is achieved soon after application.

Construction		Total Tape Thickness w/o Liner	Tape Color	Carrier	Liner Color, Type, Print	Liner Caliper	Tape Color
Product	Adhesive						
3M™ Double Coated Tape 9086	Modified Acrylic	7.5 mils (0.19 mm)	Translucent	Tissue –	White Paper (Glassine) with Black 3M Logo	3.0 mils (0.07 mm)	Translucent
3M™ Double Coated Tape 9087	Modified Acrylic	10.2 mils (0.26 mm)	White	PVC 1.5 mils	White Paper (Glassine) with Green 3M Logo	3.0 mils (0.07 mm)	White
3M™ Double Coated Tape 9088	Modified Acrylic	8.3 mils (0.21 mm)	Clear	Polyester 0.5 mils	White Paper (Glassine) with Red 3M Logo	3.0 mils (0.07 mm)	Clear
3M™ Double Coated Tape 9088FL	Modified Acrylic	8.3 mils (0.21 mm)	Clear	Polyester 0.5 mils	Red Polypropylene Film, No Print	3.1 mils (0.08 mm)	Clear

3M™ High Performance Double Coated Tapes with Adhesive 375 9086 • 9087 • 9088 • 9088FL

Typical Physical Properties and Performance Characteristics **Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.**

Typical Adhesion		3M™ Double Coated Tapes			
		9086 Oz/in (N/10 mm)	9087 Oz/in (N/10 mm)	9088 Oz/in (N/10 mm)	9088FL Oz/in (N/10 mm)
180 Degree Peel ASTM D3330 Modified, 2-mil Aluminum Backing (Faceside Adhesion)	Stainless Steel	146 (16)	142 (16)	137 (15)	137 (15)
	Polycarbonate	162 (18)	146 (16)	155 (17)	155 (17)
	Glass	146 (16)	164 (18)	128 (14)	128 (14)
	ABS	137 (15)	146 (16)	119 (13)	119 (13)
	HDPE	68 (7)	82 (9)	64 (7)	64 (7)
	High Pressure Laminate	119 (13)	119 (13)	101 (11)	101 (11)
Typical Sheer Performance	Temperature Weight	Minutes to Failure	Minutes to Failure	Minutes to Failure	Minutes to Failure
ASTM D3654 modified (1-inch ² sample size)	72°F (22°C) 1000g	10,000	10,000	10,000	10,000
	158°F (70°C) 500g	10,000	10,000	10,000	10,000
	200°F (93°C) 500g	—	—	10,000	10,000
Temperature Performance	Continuous (Days/Weeks)	185°F (85°C)	158°F (70°C)	200°F (93°C)	200°F (93°C)
	Short Term (Hours/Minutes)	248°F (120°C)	185°F (85°C)	300°F (150°C)	300°F (150°C)
Solvent Resistance		Good	Good	Good	Good
UV Resistance		Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Plasticizer Resistance⁽¹⁾		Good	Good	Good	Good

⁽¹⁾All products show good resistance to plasticizer migration. However due to the wide range of plasticizers available we strongly suggest that an evaluation is conducted prior to use to ensure compatibility. Sampling substrates with tape applied for 10 days at 158°F (70°C) will usually accelerate any potential problems. Plasticizers are typically found in materials such as polyvinyl chloride and some rubber products.

Application Ideas

- POP Displays
- Metal Fabrication
- Sports Equipment
- Indoor/Outdoor Signs
- Blind Manufacturers
- Furniture Trim
- Plastic Extrusions
- Blister Packs and Packaging
- Badge and Nameplates
- Fabric and Leather Stitching
- Print Finishing
- Splicing

3M™ High Performance Double Coated Tapes with Adhesive 375

9086 • 9087 • 9088 • 9088FL

Storage Store in original carton at 70°F (21°C) and 50% relative humidity.

Shelf Life If stored under proper conditions, product retains its performance and properties for two years from date of manufacture.

Product Use All statements, technical information and recommendations contained in this document are based upon tests or experience that 3M believes are reliable. However, many factors beyond 3M's control can affect the use and performance of a 3M product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge and control, it is essential that the user evaluate the 3M product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application.

Warranty and Limited Remedy Unless stated otherwise in 3M's product literature, packaging inserts or product packaging for individual products, 3M warrants that each 3M product meets the applicable specifications at the time 3M ships the product. Individual products may have additional or different warranties as stated on product literature, package inserts or product packages. 3M MAKES NO OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR ANY IMPLIED WARRANTY ARISING OUT OF A COURSE OF DEALING, CUSTOM OR USAGE OF TRADE. User is responsible for determining whether the 3M product is fit for a particular purpose and suitable for user's application. If the 3M product is defective within the warranty period, your exclusive remedy and 3M's and seller's sole obligation will be, at 3M's option, to replace the product or refund the purchase price.

Limitation of Liability Except where prohibited by law, 3M and seller will not be liable for any loss or damage arising from the 3M product, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, regardless of the legal theory asserted, including warranty, contract, negligence or strict liability.



This product was manufactured under a quality system registered to ISO 9001:2000 standards.



**Industrial Business
Industrial Adhesives and Tapes Division**

3M Center, Building 21-1W-10, 900 Bush Avenue
St. Paul, MN 55144-1000
800-362-3550 • 877-369-2923 (fax)
www.3M.com/industrial



Recycled Paper
40% pre-consumer
10% post-consumer

3M is a trademark of 3M Company.
Printed in U.S.A.
©3M 2007 70-0709-3995-7 (3/07)

AFTC 6406LSE -liimakalvon tekniset tiedot

SilverTape®

AFTC High Performance Tapes

Industrial 64-serie LSE

PRODUCT INFORMATION 04.2010

1/3

Application

SilverTape® Industrial 6404 LSE, 6406 LSE, 6408 LSE, 6411 LSE, 6415 LSE

Are double sided high performance acrylic based adhesive tapes, which are especially designed for a wide variety of materials with high and medium surface energy such as glass, glass / epoxy, sprouts, stainless steel, and galvanized steel. The tapes are capable of absorbing the differing thermal expansions of the two different materials. These types maintain high impact resistance even at temperatures below 0 °Celsius.

SilverTape® Industrial 6404 LSE, 6406 LSE, 6408 LSE, 6411 LSE, 6415 LSE

This modified multipurpose adhesive tape is suitable for coatings and plastics with low energy surfaces (LSE) and has been specifically developed for applications where the use of a primer or adhesion promoter is not needed. High performance tapes from the 64 series have an excellent initial tack and adhesion during the application of powder coated surfaces, plastics, glass and other high energy surfaces. Other features include good plasticizer resistance and very good adaptability. Thin or textured surfaces can be bonded full surface and tension free. Noteworthy is the good impact resistance of these 64 types at temperatures below 0 °Celsius. This next generation version is an improved version of the 63-serie.

General Information

SilverTape® Industrial 6404 LSE, 6406 LSE, 6408 LSE, 6411 LSE, 6415 LSE

Have a closed cell structure which is wind and water resistant. Because they are 100% acrylic based, they will form an almost indestructible bond between the materials. This family is resistant to UV, ageing, softening agents and solvents (good plasticizer resistance). These tapes bond immediately and offer a perfect resistance to the peel and shear loads that can affect a bond. These types are very well suited to absorb dynamic loads as they are viscoelastic, they can act as a sealant, form a permanent tension free bond, and are suitable to bond many different types of synthetic materials. Our production facilities have more than 15 years of experience producing these acrylic foam tapes and are ISO 14001, ISO 9001 and ISO/TS 16949 certified.

AFTC High Performance Tapes

Industrial 64-serie LSE

PRODUCT INFORMATION 04.2010

2/3

Structure

Tape type:	6404 LSE	6406 LSE	6408 LSE	6411 LSE	6415 LSE
Adhesive:	High Performance Acrylic				
Adhesive carrier:	Conformable Closed Cell Acrylic Foam				
Description:	LSE Ceramic / Silicones				
Coating:	Coating 60 (liner side)		Coating 60 (open side)		
Thickness:	0,40 mm	0,64 mm	0,80 mm	1,10 mm	1,50 mm
Tolerance:	± 0,1 mm	± 0,1 mm	± 0,1 mm	± 0,1 mm	± 0,1 mm
Density:	600	600	600	600	880
Tape Color:	Black	Black	Black	Black	Black
Liner:	Red PE film (paper liner is optional)				

Tape Characteristics

Tape type:	6404 LSE	6406 LSE	6408 LSE	6411 LSE	6415 LSE
Peel Adhesion: (ASTM D 3330)	15 N/cm	17 N/cm	19 N/cm	24 N/cm	31 N/cm
Normal Tensile: (ASTM 897)	730 kPa	730 kPa	730 kPa	650 kPa	610 kPa
Dynamic Shear:	740 kPa 20min.	720 kPa 20min.	680 kPa 20min.	650 kPa 20min.	620 kPa 20min.
Overlap: (ASTM 1002)	900 kPa 24h.	880 kPa 24h.	780 kPa 24h.	710 kPa 24h.	700 kPa 24h.
Static Shear: (ASTM 3654)	880 kPa	880 kPa	780 kPa	710 kPa	700 kPa
Solvent Resistance:				Excellent	
UV Resistance:				Excellent	
Temperature Resistance					
Long term:				90	
Short term:				120	

Available Sizes

Standard Length:	330 - 500 m
Maximum Length:	1000 m
Core Diameter:	75 - 130 mm
Standard Width Tolerance:	± 0,4 mm

AFTC High Performance Tapes

Industrial 64-serie LSE

PRODUCT INFORMATION 04.2010

3/3

Manual Production

Every good bond starts with good preparation. This preparation consists of several steps, such as cleaning, use of a primer and the right working area. Please ensure that your workshop area is in a dust free environment and has a minimum room temperature of ca. 15 °Celsius.

Cleaning

Before you begin, always check how dirty the materials that you want to bond are. If they are highly contaminated with oil or grease, clean it with an industrial cleaner (SilverTape® Cleaner) or a heptanes solution. Even when the surface is clean, use our SilverTape® Cleaner, which is a 100% Isopropanol solution. Ensure that you wipe the surface in just one direction, so that the dirt is wiped off. If you do not do this you will always leave some dust or dirt on the substrate.

Quality

The quality of the bond also depends largely on the contact that the two surfaces make with each other. Because of its viscoelasticity, the tape is able to flow into the microscopic pores of the materials. However, if there is a big surface mismatch or if the materials are not pressed together the bond will reach its end strength more slowly, or not at all. Therefore we advise you to put pressure on the bond of at least 100 kPa to allow the tape to make a perfect bond between the two materials.

Maximum Bond

The end strength will be reached much faster if you use our SilverTape® Primer no. 22. This enables the tape to reach its end bond within 5 – 20 minutes instead of taking 72 hours. On making the bond the tape without the primer normally has 50% of its final bond strength and with use of the primer this will be boosted up to 80%. If you have any questions regarding the primer, the manual or the mechanical application, please contact our technical sales team.

Storage & Shelf life

Please make sure that the tape is stored in its original packaging, in a dry place and at a temperature of preferably between 4 °C and 38 °Celsius. When the tape is stored under the right conditions it has a shelf life of 18 months.

Important Information

All technical data in this product data sheet is based on our own experience and external test institutes. These values are representative and cannot automatically be used for your own specific application. You will first need to test whether the tape is suitable for your application or project. We must point out that you need to follow the rules and regulations that are applicable in the state, county or country that you are using our product in. If you have any questions regarding the use of our acrylic foam tape, please contact our technical service or technical sales team. For questions on the warranty we refer to our delivery terms and conditions, or another warranty document should be agreed on in writing between us and the customer. SilverTape® is a brand name of AFTC.

3M 3731 -kuumaliiman tekniset tiedot

3M

Jet-melt™

Polyolefin Bonding Adhesive

3731

Technical Data
June, 2002

Product Description 3M™ Jet-melt™ Polyolefin Bonding Adhesive 3731 is a 100% solids, high heat resistant adhesive that bonds to a variety of substrates including polyethylene, polypropylene and many other plastics.

Features

- Solvent free, 100% solids
- High temperature resistance
- Bonds well to polyolefin based plastics
- Light tan color
- Fast setting

Typical Physical Properties

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Color	Light Tan
Specific Gravity	.92
Flash Point (C.O.C.)	525 °F (273 °C)
Viscosity @ 375 °F⁽¹⁾ (191 °C)	12,000 cps
Ball & Ring⁽²⁾	315 °F (157 °C)
Bonding Range - 1/8" Bead (sec.)⁽³⁾	25-30 seconds
Impact Resistance (Inch lbs @ 72 °F)	80

⁽¹⁾Brookfield Thermocel Viscometer in Centipoise using a #27 Spindle @ 10 RPM.

⁽²⁾ASTM E-28-607.

⁽³⁾1/8" semicircular bead, Douglas Fir to Douglas Fir.

3M™ Jet-melt™
Polyolefin Bonding Adhesive
3731

Typical Performance Properties

Note: The following technical information and data should be considered representative or typical only and should not be used for specification purposes.

Heat Resistance

Load (PSI)	Temperature
.33 lbs (150 grams)	305°F (152°C)
1 lbs (454 grams)	275°F (135°C)
2 lbs (908 grams)	265°F (129°C)

Overlap Shear Strength

Substrate	Value (Pounds Per Square Inch)
Polypropylene	550 PSI
HDPE	420 PSI
ABS	450 PSI
P.V.C. (Rigid)	430 PSI
Polystyrene (High Impact)	257 PSI
Polycarbonate	430 PSI
Nylon 66	475 PSI
Douglas Fir	490 PSI
Cold Rolled Steel	390 PSI

180° Peel Adhesion (Canvas bonded to various substrates)

Substrate	Value (Pounds Per Inch Width)
Polypropylene	22 PIW
HDPE	23 PIW
ABS	23 PIW
P.V.C. (Rigid)	18 PIW
Polystyrene (High Impact)	15 PIW
Polycarbonate	22 PIW
Nylon 66	19 PIW
Cold Rolled Steel	15 PIW

3M™ Jet-melt™
Polyolefin Bonding Adhesive
3731

Directions for Use

1. 3M™ Jet-melt™ Polyolefin Bonding Adhesive 3731 is designed for applications using a 3M™ Polygun™ EC Applicator at the 4 or 5 module setting or a 3M™ Polygun™ II Applicator.
2. Recommended equipment temperature for bulk dispensing 350-375°F (177-191°C).
3. Apply to one surface. Make bond as soon as possible. Bond strength is maximized when open time is reduced.
4. After bond is made, there is immediate strength and no clamping is necessary.
5. Adhesive should be allowed to fully crystallize (possibly up to 12 hours) to obtain full performance properties.

3M™ Jet-melt™ Polyolefin Bonding Adhesive 3731

Precautionary Information

Refer to Product Label and Material Safety Data Sheet for health and safety information before using this product. For additional health and safety information, call 1-800-364-3577 or (651) 737-6501.

For Additional Information

To request additional product information or to arrange for sales assistance, call toll free 1-800-362-3550 or visit www.3M.com/adhesives. Address correspondence to: 3M Engineered Adhesives Division, 3M Center, Building 220-7E-01, St. Paul, MN 55144-1000. Our fax number is 651-733-9175. In Canada, phone: 1-800-364-3577. In Puerto Rico, phone: 1-787-750-3000. In Mexico, phone: 52-70-04-00.

Important Notice

3M MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. User is responsible for determining whether the 3M product is fit for a particular purpose and suitable for user's method of application. Please remember that many factors can affect the use and performance of a 3M product in a particular application. The materials to be bonded with the product, the surface preparation of those materials, the product selected for use, the conditions in which the product is used, and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform are among the many factors that can affect the use and performance of a 3M product. Given the variety of factors that can affect the use and performance of a 3M product, some of which are uniquely within the user's knowledge and control, it is essential that the user evaluate the 3M product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application.

Limitation of Remedies and Liability

If the 3M product is proved to be defective, THE EXCLUSIVE REMEDY, AT 3M'S OPTION, SHALL BE TO REFUND THE PURCHASE PRICE OF OR TO REPAIR OR REPLACE THE DEFECTIVE 3M PRODUCT. 3M shall not otherwise be liable for loss or damages, whether direct, indirect, special, incidental, or consequential, regardless of the legal theory asserted, including, but not limited to, contract, negligence, warranty, or strict liability.



This Engineered Adhesives Division product was manufactured under a 3M quality system registered to ISO 9002 standards.



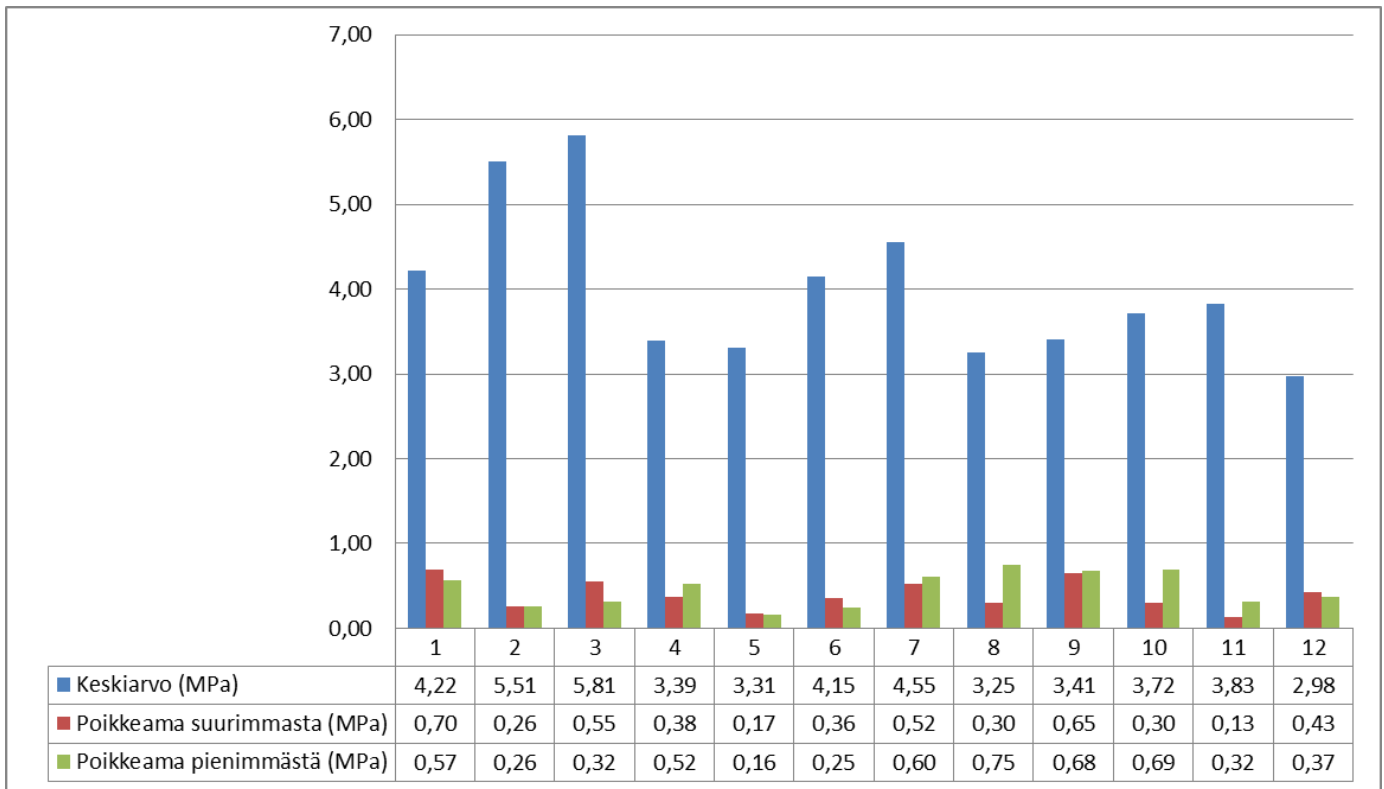
Engineered Adhesives Division
3M Center, Building 220-7E-01
St. Paul, MN 55144-1000



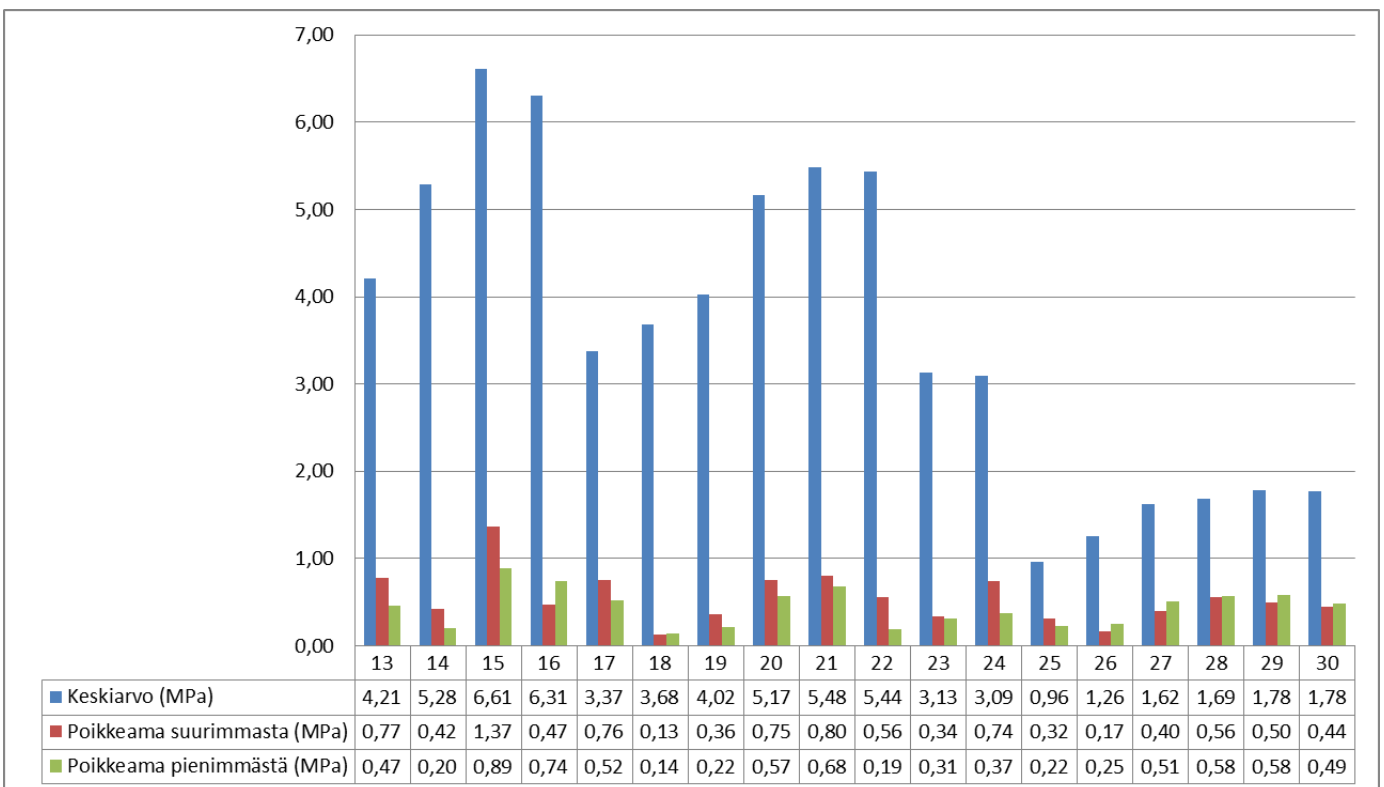
Recycled Paper
40% pre-consumer
10% post-consumer

Printed in U.S.A.
©3M 2002 78-6900-9976-3 (6/02)

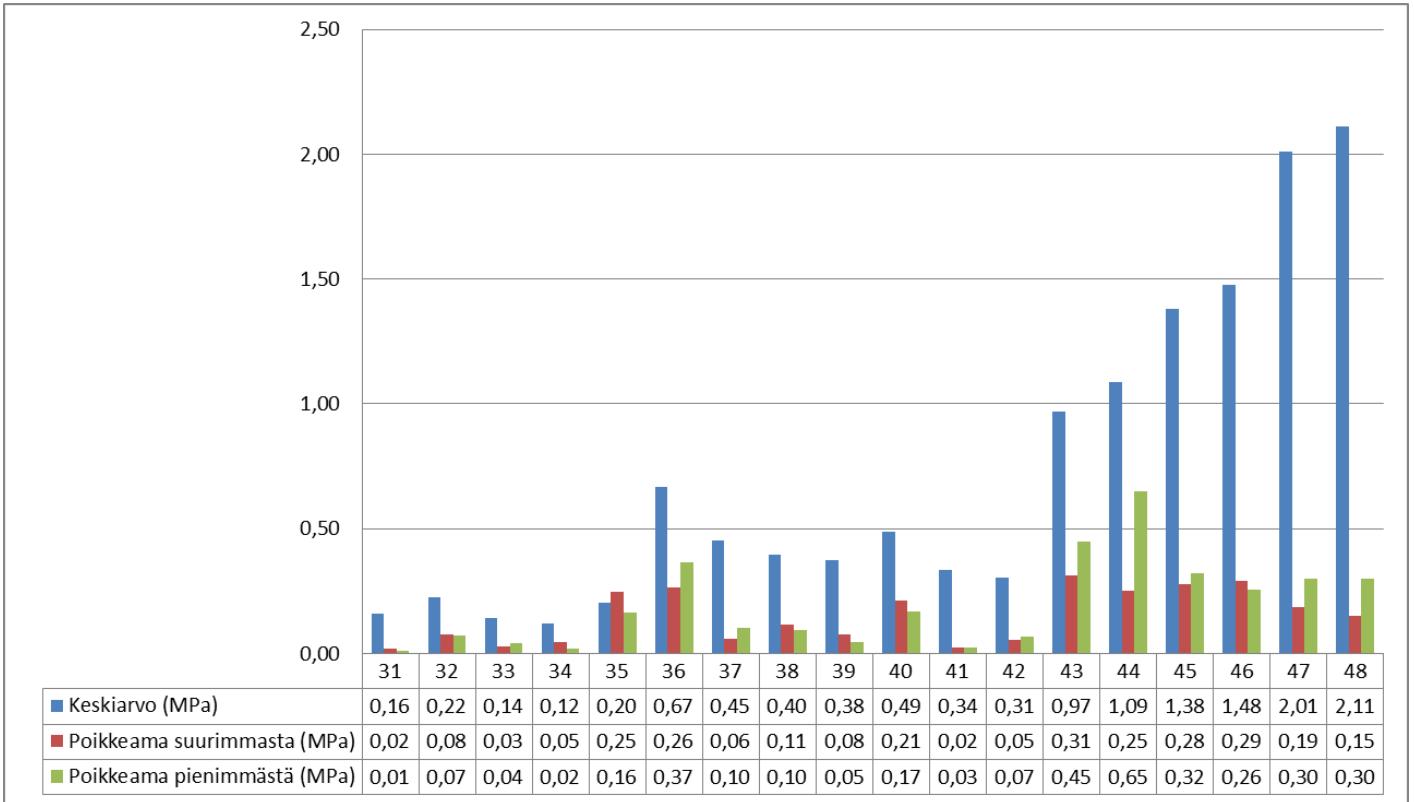
Veto-leikkauslujuuskokeiden keskimääräiset tulokset ja vaihteluvälit sarjoittain



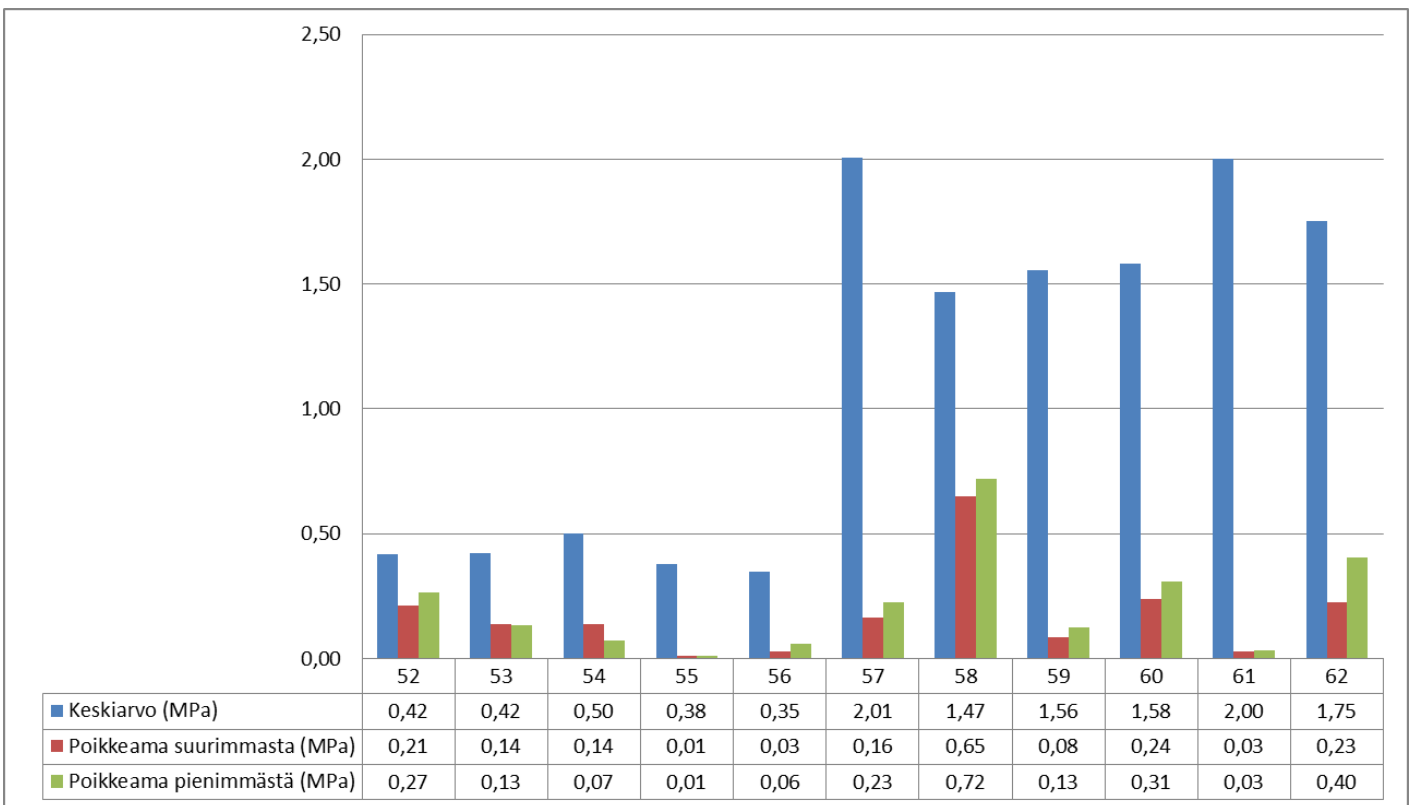
Kuvio 1. Sarjat 1–12



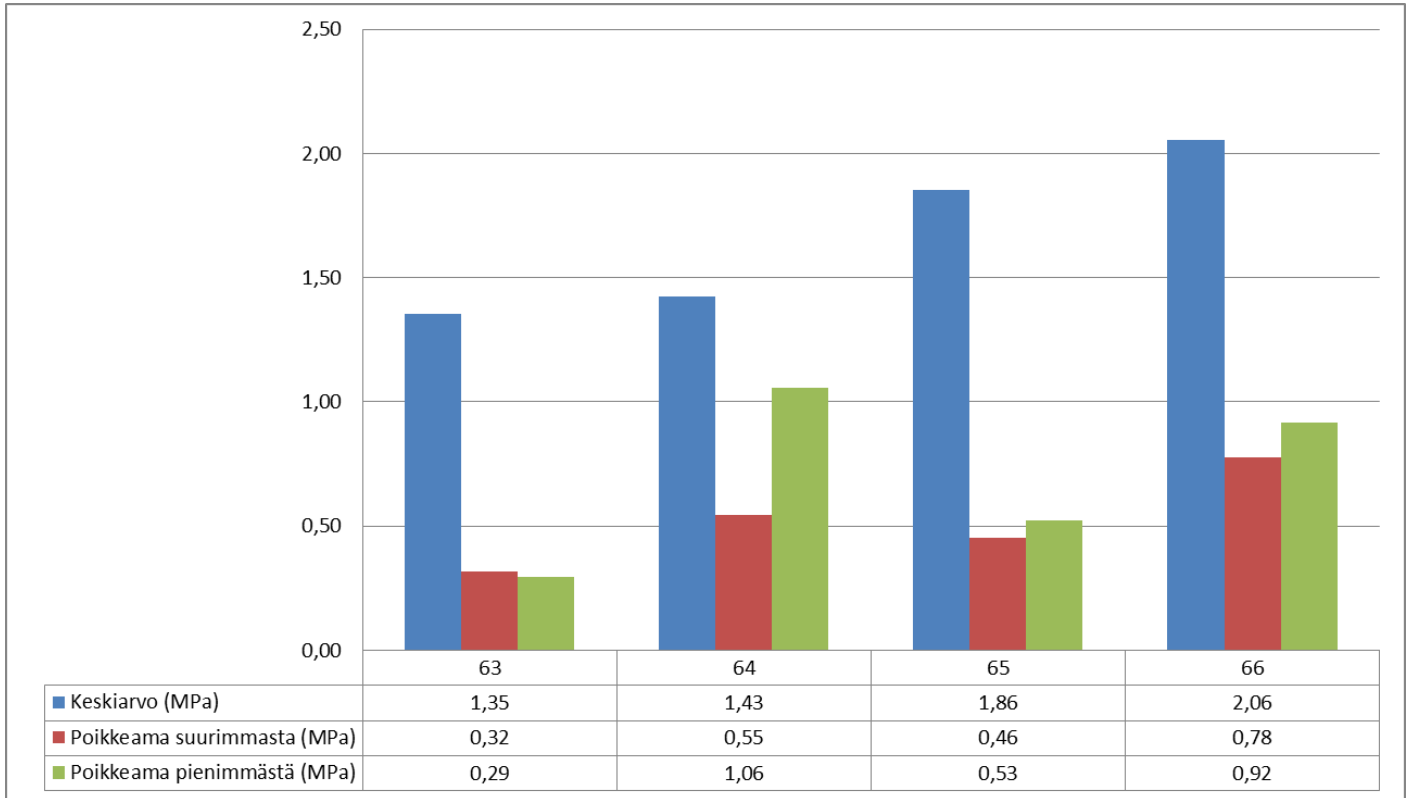
Kuvio 2. Sarjat 13–30



Kuvio 3. Sarjat 31–48



Kuvio 4. Sarjat 52–62



Kuvio 5. Sarjat 63–66