



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

PUUMUOVIKOMPOSIITIN HITSAUS

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Marko Palo-oja

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

PALO-OJA, MARKO:

Puumuovikomposiitin hitsaus

Muovitekniikan opinnäytetyö, 59 sivua, 4 liitesivua

Kevät 2013

TIIVISTELMÄ

Tässä versiossa kokeellinen osio on jätetty kokonaan pois luottamuksellisuuden vuoksi.

UPM ProFi valmistaa puumuovikomposiitteja pääasiassa ulkotiloihin. ProFi:n komposiitit ovat valmistettu polypropeenista (PP) ja tarralaminaatti jätteestä.

Työn tarkoituksena oli selvittää ProFi puumuovikomposiitin hitsausmahdollisuuksia ja testata niitä. Koekappaleina olivat ProFi terassilauta ja ProFi peitelista, joihin testattiin puskuhitsaus menetelmää ja ultraäänihitsaus menetelmää. Koekappaleiden hitsauslujuudet testattiin vetokokeella. Kokeiden suunnittelussa ja analysoinnissa käytettiin Tagutchi-menetelmää, joka on yleisesti käytetty teollisen koesuunnittelun menetelmä sen tehokkuuden vuoksi.

Teoriaosuus alkaa yleiskatsauksella muovikomposiittien ja polypropeenin ominaisuuksista. Työssä perehdytään myös kestopuovikomposiittien valmistus- ja hitsausmenetelmiä, testausmenetelmä ja teollinen koesuunnittelu.

Tutkimusosassa käydään läpi kokeiden suoritus ja testaus. Kokeiden suunnittelu ja analysointiin käytettiin Tagutchi-menetelmää. Se on yleisesti käytetty menetelmä teollisessa koesuunnittelussa sen tehokkuuden vuoksi. Tagutchi-menetelmässä käytettiin kahta ortogonaalimatriisia, jotka olivat L4 ja L8. Nämä matriisit auttoivat kokeiden suunnittelussa ja tulosten analysoinnissa. Analyysien perusteella tehtiin varmistuskokeet, jotka osoittivat olivatko testit onnistuneet vai eivät.

Kirjallisuuden ja testien perusteella selvisi, että komposiittien hitsaukseen soveltuvat samat menetelmät kuin tavallisten muovienkin. Hitsauksen laatuun vaikuttaa muovikomposiitin lujitepitoisuus. Alle 30 % lujitepitoisuuksilla saavutetaan hyviä hitsauslujuuksia, mutta pitoisuuden kasvaessa hitsauksen lujuus heikkenee. Tämä johtuu siitä, ettei hitsaukseen ole tarpeeksi muovia.

Asiasanat: puumuovikomposiitti, puskuhitsaus, ultraäänihitsaus, Tagutchi-menetelmä, ortogonaalimatriisi, signaali-kohinasuhde

Lahti University of Applied Sciences
Degree programme in plastics engineering

PALO-OJA, MARKO: Welding of wood plastic composites

Bachelor's Thesis in plastic engineering , 59 pages, 4 pages of appendices

Spring 2013

ABSTRACT

In this version practical part has left entirely out because of its confidentiality.

UPM ProFi makes wood plastic composites (WPC) mainly for outdoor use. The ProFi composites are made of polypropylene and sticker laminate waste.

The aim of this thesis was to study the possibilities of welding ProFi WPC and the welded specimens. The test products were ProFi Deck and ProFi Covering Strip. The tests were carried out by using two different welding methods, hot plate welding and ultrasonic welding. Tensile tests were used for testing the strength of the welded specimens.

The theory section starts with an overall survey of plastic composites and the properties of polypropylene and ProFi. The study continues by dealing with the manufacturing methods, welding methods and testing of thermal plastic composites and then describes the industrial design of experiment (DOE).

The practical part deals with how tests were carried out and tested. Planning the tests and analyzing the test results used was done with the Tagutchi method. It is commonly used in industrial DOE, because of its effectiveness. Two different orthogonal matrixes, L4 and L8, were used. These matrixes helped in planing the tests and analysing test results. Confirmation tests were done to show if the tests had succeeded or not.

Based on literature and tests, it was found out that for welding plastic composites one can use the same methods as with normal plastics. The quality of welding depends on the percentage of reinforcement. Less than 30 % percent of reinforcement can produce good welding strength but when the percentage grows, the welded joint gets weaker. This is because there is not enough plastic for welding.

Key words: plastic composite, hot plate welding, ultrasonic welding, Tagutchi method, orthogonal matrix, signal to noise ratio

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	MUOVIKOMPOSIITIT	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Matriisi muovit	2
2.2.1	Polypropeenit (PP)	3
2.2.2	Polypropeenin kemiallinen rakenne	3
2.2.3	Polypropeenin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	5
2.2.4	Polypropeenin käyttösovellukset	6
2.3	Lujitteet ja lisäaineet	6
2.3.1	Luonnonkuitu lujitteet	7
2.3.2	Kytkeäaine	7
2.4	Puolivalmisteet	8
2.5	Lujitemuovien kierrätys	9
3	VALMISTUS- JA TESTAUSMENETELMÄT	11
3.1	Ekstruusio	11
3.2	Ruiskuvalu	12
3.2.1	Valmistusmenetelmä	13
3.2.2	Ruiskuvalukone	13
3.2.3	Lujitettujen ruiskuvalukappaleiden ominaisuudet	14
3.3	Vetokoe	15
4	MUOVIN JA MUOVIKOMPOSIITTIN HITSAUS	17
4.1	Yleistä	17
4.2	Hitsausmenetelmät	17
4.2.1	Puskuhitsaus (Peilihitsaus)	18
4.2.2	Ultraäänihitsaus	18
4.2.3	Kuitupitoisuuden vaikutus hitsaukseen	20
4.2.4	Muita muovien ja muovikomposiittien hitsausmenetelmiä	21
5	TEOLLINEN KOESUUNNITTELU	22
5.1	Yleistä	22
5.2	Taguchi-menetelmä	23
5.2.1	Parametrisuunnittelu	24
5.2.2	Parametrit	25

5.3	Kokeen suoritus ja datan kerääminen	26
5.3.1	Ortogonaalimatriisi	26
5.3.2	Signaali-kohinasuhde (S/N)	28
5.4	Datan analysointi	29
5.5	Tarkastuskoe	30
	LÄHTEET	32

1 Johdanto

Ekologinen ajatusmaailma on kasvava trendi kuluttajien keskuudessa. Ihmiset haluavat tuotteita, jotka rasittavat mahdollisimman vähän luontoa ja ovat kierrätettävissä. Tämä ja tiukentuneet direktiivit sekä nousseet jätemaksut ovat saaneet yritykset satsaamaan luonnonmukaisiin raaka-aineisiin, kuten luonnonkuitujen käyttämistä lasikuidun sijaan muovikompostiteissä. Aina tämä ei ole helppoa, kun tuotteelta vaaditaan lujuutta, pitkää ikää, kierrätettävyyttä ja ympäristöystävällisyyttä.

Tässä työssä oli tarkoitus selvittää puumuovikomposiitin hitsausmahdollisuuksia ja testata hitsausseamien lujuuksia. Koemateriaalina käytettiin UPM ProFi puumuovikomposiittia, joka on valmistettu polypropeenista (PP) ja tarralaminaattijätteestä. Kokeita tehtiin kahdelle UPM ProFi:n tuotteelle kahdella eri hitsausmenetelmällä. Tutkimuskohteina olivat ProFi:n terassilaudat, joita hitsattiin puskuhitsauksella, ja ProFi:n peitelistat, joihin hitsattiin polypropeeninauhaa ultraäänihitsauksella. Testausmenetelmänä käytettiin vetokoetta.

Kokeiden suorittamisessa ja analysoinnissa käytettiin apuna teollisessa koesuunnittelussakin yleisesti hyödynnettyä Taguchi-menetelmää, jossa käytetään hyväksi insinööri- ja tilastotekniikkaa. Menetelmän suurimpia etuja ovat huomattavasti pienemmät koemäärät verrattuna perinteisiin koemenetelmiin ja suoritusarvon lisääminen ja vaihtelun pienentäminen samanaikaisesti.

Tutkimus oli mielenkiintoinen, koska UPM ProFi:n puumuovikomposiitin hitsaus oli tutkimuskohteena uusi ja antaa edellytykset mahdollisille jatkotutkimuksille.

2 Muovikomposiitit

2.1 Yleistä

Komposiiteiksi kutsutaan kahden tai useamman materiaalin yhdisteitä, joissa materiaalit toimivat yhdessä, mutta eivät ole lienneet tai sulautuneet yhteen. Yleensä komposiiteista voidaan nimetä ainesosa, joka sitoo materiaaliyhdistelmän kokonaisuudeksi. Tätä ainesosaa kutsutaan matriisiksi. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifwars & Komppa 2007, 17.)

Muovikomposiitit ovat komposiittien yksi tärkeimmistä alaryhmistä, joissa muovi toimii matriisina. Matriisin yhteen sitomat ainesosat voivat olla täyte- ja seosaineita tai ohuita lujitekuituja. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifwars & Komppa 2003, 17.) Täyte- ja seosaineilla pyritään parantamaan komposiittin paloturvallisuutta, lämmön- ja sähkönjohtavuutta tai säästämään raaka-aine kustannuksissa. Lujitekuiduilla puolestaan pyritään sananmukaisesti parantamaan komposiitin lujuusominaisuuksia. (Saarela, Airasmaa, Kokko, Skrifwars & Komppa 2007, 19, 20.)

2.2 Matriisi muovit

Muovit voidaan jaotella monella eri tavalla. Valmistajien yleisesti käyttämä tapa on jakaa ne käytön mukaan valtamuoveihin, teknisiin muoveihin tai erikoismuoveihin. Toinen yleinen tapa on jakaa ne kahteen suureen pääryhmään niiden muovautumisominaisuuksien perusteella, kestumuoveihin ja kertamuoveihin. (Kurri, Malen, Sandell & Virtanen 2008, 19.)

Kestomuoveille (esim. PE, PVC ja PP) ominaista on niiden uudelleen muovailtavuus lämmön ja paineen avulla. Molekyylejä yhdessä pitävät voimat heikkenevät, kun muoveja lämmitetään ja puolestaan vahvistuvat jäähtyessään. Tämä mahdollistaa sen, että kestumuoveja voidaan sulattaa, ja niistä voidaan tehdä uusia tuotteita yhä uudelleen ja uudelleen. Yleensä kierrätetyn muovin joukkoon lisätään tietty määrä neitseellistä polymeeriä, jotta laatu pysyy tarpeeksi hyvänä. (Saarela ym. 2007, 18.) Kestomuovien korkean viskositeetin johdosta kuitujen kunnollinen kastuminen komposiittien valmistuksessa on vaikeaa.

Lisäksi korkeat lämpötilat prosessoinnin aikana voivat aiheuttaa ei-toivottuja muutoksia kuiduissa tai jopa tuhota ne kokonaan. (Fabrín & Vuorinen 2004, 5.)

Huomattavasti pienemmän pääryhmän muodostavat kertamuovit (esim. polyesterihartsit, epoksihartsit ja PUR). Kertamuovien perusraaka-aineena on hartsi, jonka kovettumisreaktiossa polymeeriketjut silloittuvat eli kytkeytyvät toisiinsa verkkomaiseksi rakenteeksi. Reaktion seurauksena syntynyttä verkottunutta rakennetta ei voida muokata uudelleen. (Saarela ym. 2007, 18.)

2.2.1 Polypropeeni (PP)

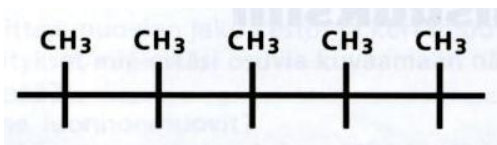
Polypropeeni kuuluu valtamuoveihin ja on polyeteenin (PE-LD) ja polyvinyylikloridin (PVC) jälkeen kolmanneksi yleisimmin käytetty muovi (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 18). Polypropeeni on osakiteinen muovi, jonka kiteisyysaste on 40 % -60 %, mutta se voidaan nostaa usein 70 % lämpökäsittelyllä. (Seppälä 2003, 146.) Polypropeenit ovat käyttömäärältään nopeimmin kasvavia muoveja, koska niiden saatavuus erilaisina lajikkeina on todennäköisesti laajempaa kuin millään muilla muoveilla. Lisäksi niitä on saatavilla kaikkiin työstötekniikoihin ja useisiin eri käyttösovelluksiin. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 18.)

Polypropeenin lisääntyvä käyttö luonnonkuitukomposiittien matriisina johtuu sen edullisuudesta, kohtuullisista prosessointilämpötiloista ja kierrätettävyydestä. Käytettäessä käsittelemätöntä polypropeenia adheesio matriisin ja kuitujen välillä ei ole hyvä. Tästä johtuen komposiitin ominaisuudet eivät juuri parane verrattuna matriisimuovien ominaisuuksiin, joten luonnonkuidut toimivat komposiitissa enemmänkin täytteenä kuin lujitteena. Luonnonkuidut toimivat lujitteina vain, jos komposiitin valmistuksessa on käytetty kompatibilisaattoreita eli lisäaineita. (Fabrín & Vuorinen 2004, 5,6.)

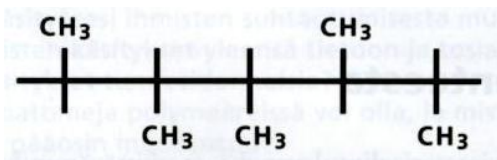
2.2.2 Polypropeenin kemiallinen rakenne

Polypropeeni koostuu pelkästään hiilestä (C) ja vedystä (H). Sitä valmistetaan polymeroimalla propeenia Ziegler-Natta- tai metalloseenikatalyytin läsnä ollessa kaasufaasissa. Lujitettuja ja täytettyjä polypropeeneja valmistetaan homo- ja

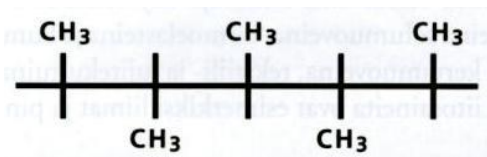
kopolymeereistä. Yleisimmin käytetään kuitenkin homopolymeerejä, joissa kaikki monomeerit ovat samanlaisia, kun taas kopolymeereissä monomeerin rakenne vaihtelee. (Saarela 2008, 53,54.) Muovin ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi riippuen siitä miten polymeerit ovat rakentuneet monomeereistä. Tällöin puhutaan polymeerin taktisuudesta eli siitä miten sivuryhmät (CH_3) ovat sijoittuneet pääryhmän suhteen (KUVIO 1, 2 & 3). (Kurri ym. 2008, 37, 38.)



KUVIO 1. Isotaktinen polypropeeni (IPP) CH_3 - ryhmät sijaitsevat säännöllisesti samalla puolella molekyyliirunkoa (Kurri ym. 2008, 38)



KUVIO 2. Ataktisen polypropeenin (APP) CH_3 - ryhmät sijaitsevat satunnaisesti molekyyliirunon molemmilla puolilla (Kurri ym. 2008, 38)



KUVIO 3. Syndiotaktinen polypropeeni (SPP) CH_3 - ryhmät sijaitsevat säännöllisesti molekyyliirunon molemmiin puolin vaihdellen (Kurri ym. 2008, 38).

Yleensä isotaktiset ja syndiotaktiset polymeerit ovat osittain kiteisiä ja ataktiset amorfisia. Isotaktista polypropeenia käytetään teknisiin sovelluksiin, ja se on myös käytetyin polypropeenin rakenne. Syndio- ja ataktista rakennetta käytetään huomattavasti vähemmän. (Kurri ym. 2008, 38.) Rakenteita voidaan myös sekoittaa keskenään, jolloin voidaan parantaa polymeerin ominaisuuksia. Kaupallinen polypropeeni on usein sekoitus rakenteeltaan erilaisia molekyyliketjuja, joiden keskinäinen suhde määräytyy polymeeraatioreaktiossa.

Paras polymeerirakenne käytännön sovelluksiin saadaan, kun isotaktisessa polypropeenissa on pieni määrä (5-20 %) ataktista rakennetta. Lisäksi isotaktisen polypropeenin kiteytyminen alkaa jo prosessoinnin aikana (+75–80 °C), joka lisää sen hyvien ominaisuuksien määrää. (Koleva & Nykänen 2012, 1.)

2.2.3 Polypropeenin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Polypropeeni on kestävä, usein muita muoveja jäykempi materiaali, ja sillä on hyvä väsymiskestävyys. Polypropeenin kiteisyysaste on pientiheyspolyeteenin (PE-LD) ja korkeatiheyspolyeteenin (PE-HD) kiteisyysasteiden välillä.

Polypropeeni ei ole niin sitkeä materiaali kuin PE-HD eikä niin joustava kuin PE-LD, ja se on huomattavasti hauraampi kuin PE-HD. Polypropeenin vetokäyttämiseen vaikuttaa enemmän kuormituksen nopeus ja lämpötila kuin polyeteenin. Hitailta vetonopeuksilla polypropeenin mekaaniset ominaisuudet ovat selvästi parempia kuin nopeilla vetonopeuksilla. (Koleva & Nykänen 2012, 2.)

Taulukossa (TAULUKKO 1.) on vertailtu ruiskuvaletun ja ekstrudoidun polypropeenin ominaisuuksia (Seppälä 1997, 147).

TAULUKKO 1. Polypropeenin ominaisuuksia (Seppälä 1997, 147)

Ominaisuudet	Ruiskupuristuslaatu	Ekstruusiolaatu
Tiheys g/cm ³	0,907	0,902
Sulamassavirtahuku [g/10 min] (230°/5.0 kg)	27	1,3
Sulamislämpötila, °C	164-167	160-165
Jännitys myötörajalalla, MPa	38	31
Venymä myötörajalalla, %	12	16
Murtolujuus, MPa	25	34
Murtovenymä, %	20	700
Kuulapuristuskovuus (30s), MPa	78	64
Lovi-iskulujuus, mJ/mm ²	5	11
Pituuden lämpötilakerroin, K ⁻¹	1,8x10 ⁻¹	1,8x10 ⁻⁴
Ominaisvastus, Ω cm	>5x10 ¹⁶	5x10 ¹⁶

2.2.4 Polypropeenin käyttösovellukset

Yleisin polypropeenin valmistusmenetelmä on ruiskuvalu, jolla tehdään esimerkiksi rasioita ja koteloita. Lisäksi polypropeenista voidaan valmistaa kuitukankaita, köysiä, putkia, kalvoja ja levyjä. Polypropeenista valmistetaan myös kalvosaranoita, jotka oikein valmistettuina kestävät miljoonia taivutuskertoja. Kalvosaranoita käytetään esimerkiksi maustepurkkien kansissa. (Järvinen 2000, 26, 27.)

2.3 Lujitteet ja lisäaineet

Lujitteiden tehtävänä on kantaa komposiittiin kohdistuvat kuormitukset. Matriisimuovi sitoo lujitteet toisiinsa samalla siirtäen kuormitukset niiden kannettavaksi. Täyteaineilla pystytään parantamaan joitakin muovien mekaanisia ominaisuuksia, mutta varsinaisiksi lujitteiksi lasketaan vain kuidut, jotka on valmistettu ja käsitelty vain tätä tarkoitusta varten. (Saarela ym. 2007, 74.)

Kuitulujitettuja muoveja käytetään erityisesti tuotteissa, joilta vaaditaan keveyden lisäksi suurta jäykkyyttä ja lujuutta. Tällaisia sovelluksia on tyypillisesti ilmailu-, avaruus- ja urheiluteollisuudessa. Taukukosta 2 nähdään 2000- luvun alun lujitteiden käyttömäärät lujitemuovituotteiden valmistuksessa. (Saarela ym. 2007, 74.)

TAULUKKO 2. Eri lujitekuitujen arvioitu valmistuskapasiteetti v.2008 (Saarela ym. 2007, 74).

Kuitu	Valmistus kapasiteetti (t)	Prosenttiosuus (%)
Lasikuidut (E, R ja S-kuidut)	3 300 000	95,2
Hiilikuidut	56 000	1,6
Aramidikuidut	55 000	1,6
Luonnonkuidut (kasvikuidut)	48 000	1,4
HP-Polyeteenikuidut	8 000	0,2
Muut lujitekuidut	50	0
Yhteensä	3 467 050	100

2.3.1 Luonnonkuitu lujitteet

Luonnonkuiduiksi luetaan eläinkarvat, puukuidut ja kasvikuidut. Muovien lujittamiseen käytettiin alkuaikoina luonnonkuituja, joiden käyttö menetti merkityksensä lasikuitujen tullessa markkinoille. Lasikuidun mekaaniset ja fysikaaliset ominaisuudet syrjäyttivät luonnonkuidut. Teollisuusmaiden kiinnostus luonnonkuituja kohtaan on kuitenkin jälleen kasvanut. Niiden käytön tekee houkuttelevaksi halpa hinta, pieni tiheys ja ympäristöystävällisyydestä sekä lujitemuovituotteiden kierrätystä ja jätteiden hävittämistä koskevien lainsäädännöksiä muutokset. Tuotteita voidaan kierrättää useita kertoja ilman, että lujuusominaisuudet alentuisivat merkittävästi. Kuidut eivät myöskään ärsytä ihoa, mikä on merkittävä etu eri valmistusprosesseissa. Luonnonkuiduilla lujitetuilla muovituotteilla on hyvä iskulujuus ja iskusitkeys, ja niillä saavutetaan paremmat äänieristysominaisuudet. Alhaisen tiheyden johdosta myös kuitujen ominaisuudet ja – kimmomodulit ovat hyvät. Esimerkiksi Pohjois-Amerilassa ja Japanissa käytetään runsaasti puusta prosessoituja sellupohjaisia kuituja rakennusteollisuuden sovelluksiin. (Saarela ym. 2007, 99.)

Luonnonkuitujen käyttörajoittava tekijä on herkkyys lämmölle. Veden ja kosteuden absorptio lisää riskiä sienten ja hyönteisten hyökkäyksille. Niiden laatuvaihtelut ovat suuret, mikä vaikeuttaa valmistettavien kappaleiden mitoitusta ja näin ollen pakottaa käyttämään suuria varmuuskertoimia. (Saarela ym. 2007, 99.)

Tulevaisuuden näkymät luonnonkuiduilla muovien lujitteena on tuotteissa, joilta edellytetään biohajoavaisuutta ja kierrätettävyyttä sekä tuotteissa, joille muut lujitekuidut antavat tarpeettoman hyvät ominaisuudet. (Saarela ym. 2007, 99.)

2.3.2 Kytkeäaine

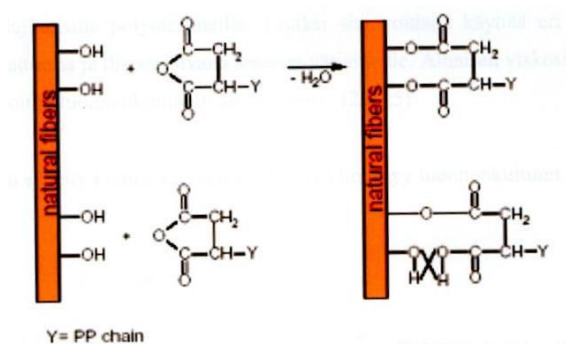
Muovikomposiitteissa käytetään monesti kytkeäaineita, joilla parannetaan matriisin ja kuidun adheesiota. Kytkeäaine muokkaa matriisin ja kuidun pinnat sellaisiksi, että niiden välille voi syntyä kemiallinen sidos. Yleisimmin käytettyjä kytkeäaineita ovat maleiinihapon anhydrilla modifioitu polypropeeni (MAPP), maleiinihapon anhydride (MA ja MAH) ja erilaiset silaatit, kuten polyeteeni-

polyfenyyli-isosyanaatti ja vinyyli-2-metoksisetoksisilaani. (Fabrin & Vuorinen 2004, 18.)

Tunnetuimpia kytkentäaineita ovat silaanit. Niiden rakenteellinen koostumus on tyyliä R-Si-X, jossa

- R on kemiallinen ryhmä, joka reagoi polymeerin kanssa
- X on hydrolysoituva ryhmä (kuten $-\text{OC}_2\text{H}_5$)

Kirjallisuuden mukaan parhaimpiin tuloksiin luonnonokuidun ja matriisimuovin välillä päästään käyttämällä maleiinihapon anhydridillä oksastettua polypropeenia (MAPP). Seuraavassa kuvassa (KUVIO 4) on esitelty, kuinka maleiinihapon anhydridillä oksastettu polypropeenivaha kiinnittyy luonnonkuituun.



KUVIO 4. MAPP ja luonnonkuidun kiinnittyminen (Fabrin & Vuorinen 2004, 19)

MAPP-kytkentäaineen tehokkuuteen vaikuttaa käsiteltävien materiaalien kosteuspitoisuudet, sillä aine reagoi ensisijaisesti veden kanssa. Myös kuitujen kostutettavuus heikkenee veden myötä, sillä vesi alentaa kuitujen pintaenergiaa. (Fabrin & Vuorinen 2004 18, 19.)

2.4 Puolivalmisteet

Puolivalmisteiksi kutsutaan tuotteita, joissa muovikomposiitin kaikki ainesosat on jo yhdistetty yhdeksi kokonaisuudeksi ennen lopullisen tuotteen valmistusta.

Niiden tarkoituksena on nopeuttaa ja/tai parantaa sen ominaisuuksia.

Puolivalmisteet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: puristemassoihin, prepregeihin ja yhdistelmätuotteisiin. (Saarela ym. 2007, 20.)

Puristemassat valmistetaan sekoittamalla ja puristamalla aineosat keskenään. Massa voidaan tarvittaessa tehdä myös valmiiksi levymäiseen muotoon, jolla voidaan helpottaa raaka-aineen annostelua ja nopeuttaa lopputuotteen valmistusta. Puristemassoille/-levyille on ominaista, että ne virtaavat muotissa tuotetta valmistettaessa. Massat sisältävät monesti myös täyteaineita ja seos- sekä apuaineita. (Saarela ym. 2007, 20.)

Esikyllästetyt lujitteet eli *prepregit* (**pre-impregnated**) valmistetaan yleensä kyllästämällä lujitekuitukimput matriisimuovilla. Prepregille ominaista on korkea lujitepitoisuus sekä virtaamattomuus tuotetta valmistettaessa. (Saarela ym. 2007, 21.)

Kolmas puolivalmisteryhmä on *yhdistelmätuotteet*. Näissä lujitteet ja hartsi voivat olla kerroksissa. Matriisimuovi voi olla myös kuituina tai pulvereina. Yhteistä kuitenkin on, että lujitteet kyllästetään yhdistelmän muoviaineella vasta lopputuotteen valmistusprosessissa. (Saarela ym. 2007, 21.)

2.5 Lujitemuovien kierrätys

Suomessa on arvioitu syntyvän 4 000 tonnia lujitemuovijätettä vuodessa, josta puolet on käytöstä poistettuja tuotteita ja puolet tuotantojätettä. Lujitemuovien kierrätystä ei ole pidetty aikaisemmin kovin kriittisenä asiana sen inertin luonteen vuoksi. Tämän vuoksi luonteva loppusijoituspaikka on ollut kaatopaikka. Suurin osa lujitemuoveista on lujitettu lasikuiduilla, jonka lujitepitoisuudet ovat yleensä 30–50 %. Lujitemuovituotteiden pitkä käyttöikä ja niiden materiaali-koostumuksen vaihtelevuus muodostavat sekalaisen ryhmän jätettä, jonka keräys, lajittelu ja käsittely on hankalaa ja kallista. Tuotantojätteen hyödyntämistä hankaloittaa niiden sekalainen koostumus, joka edellyttäisi jätteen lajittelua jo sen syntyvaiheessa. (Saarela ym. 2007, 425, 426.)

Viime aikojen kiristyneet lainsäädökset ja nousseet jätemaksut sekä kuluttajien vaatimukset kierrätettävyydestä ovat saaneet yritykset miettimään kierrätystä ja uusiokäyttöä. Tämä on myös lisännyt yritysten kiinnostusta luonnonkuiduilla lujitettuja muoveja kohtaan niiden kierrätettävyyden takia. (Saarela ym. 2007, 425.)

Kierrätys tarkoittaa jätteen hyödyntämistä energiana, raaka-aineena tai materiaalina. Kierrätysmenetelmät voidaan jakaa mekaaniseen ja kemialliseen kierrätykseen sekä polttamiseen. Mekaanisessa kierrätyksessä jäte hyödynnetään materiaalina, ja menetelmä voidaan toistaa, jos materiaalin ominaisuudet eivät huonone merkittävästi. (Saarela ym. 2007, 427.)

Kemiallisella kierrätyksellä tarkoitetaan materiaalin hajottamista uusioraaka-aineeksi erilaisten kemiallisten käsittelyjen, kuten hydrolyysin, pyrolyysin, kaasutuksen tai hydrakuksen avulla. Lujitemuovien kemiallinen kierrätys vaatii suuria materiaalimääriä ja kalliita laiteinvestointeja. (Saarela ym. 2007, 427.)

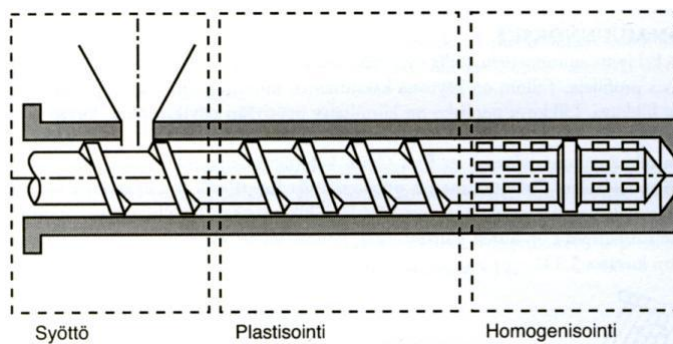
Jätteiden poltto on Euroopassa merkittävä kierrätysmenetelmä. Sen avulla käsitellään suuria määriä yhdyskuntajätettä. Lujitemuovijätteen polttamisessa ongelmana on palamaton lujite, jonka pitoisuus voi vaihdella 30–80 %:n välillä. Tämä kulkeutuu tuhkan joukkoon ja se pitää hävittää muun tuhkamateriaalin kanssa. Luonnonkuidut ja hiilikuidut soveltuvat hyvin energiajätteeksi. (Saarela ym. 2007, 428.)

Tulevaisuuden kierrätysmenetelmänä voidaan pitää jätteen energiasisällön talteenottoa yhdistettynä materiaalin talteenottoon. Lujitemuovijätteillä tämä tarkoittaa matriisimuovin polttamista energiaksi sekä lujitteiden ja täyteaineiden hyödyntämistä uuden tuotteen valmistukseen. Tätä menetelmää hyödynnetään tällä hetkellä sementin polttoprosessissa, jossa muovia käytetään sementin valmistuksen polttoaineena ja palamattomat lujitteet ja täyteaineet sementin komponentteina. Lujitemuovituotteista voidaan hyödyntää 30 % energiana ja 70 % raaka-aineena. Onnistuneita kokeita on tehty mm. Japanissa ja Ranskassa. (Saarela ym. 2007, 429.)

3 Valmistus- ja testausmenetelmät

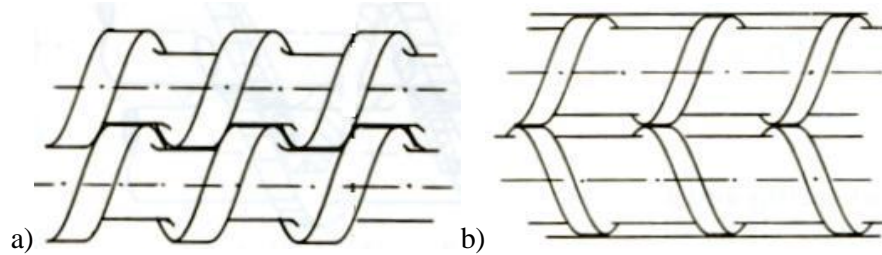
3.1 Ekstruusio

Ekstruusio eli suulakepuristus on lujittamattomien kestopuovien valmistusmenetelmä, joka soveltuu myös lujitettujen kestopuovien valmistukseen. Menetelmässä syöttösuppilosta syötetyt muovijyvät eli granulaatit sulatetaan (plastisointi vyöhyke) ja sekoitetaan (homogenisointi vyöhyke) sylinterissä olevan ruuvin avulla (KUVIO 6). Ruuvin pyöriessä ja lämpövastuksien lämmittäessä muovimassa plastisoituu ja homogenisoituu. Sula muovimassa kulkee ruuvin päästä suuttimelle, joka antaa muoville halutun muodon. Ekstruusio on jatkuva prosessi, jolla valmistetaan esimerkiksi putkia, letkuja, profileja, levyjä ja kalvoa. (Saarela ym. 2007, 189)



KUVIO 6. Ekstruderin eri vyöhykkeet (Saarela ym. 2007, 190)

Ekstruusiossa voidaan käyttää myös kahta ruuvia. Kaksoisruuvia käytetään esimerkiksi profiilekstruusiossa lämpöherkkien materiaalien, kuten PVC:n valmistuksessa sekä muovin ja seosaineiden kompaundoinnissa eli seostamisessa. Kaksoisruuvin etuina verrattuna yksiruuviseen ekstruuderiin ovat esimerkiksi parempi tuotto, ruuvin hitaampi pyörimisnopeus (n. 10rpm) ja hyvä kompaundointi. Ekstruuderissa ruuvit voivat sijaita toisiinsa nähden eri tavoin sekä pyöriä samaan suuntaan tai eri suuntiin. Ruuvien väliin jää kuitenkin aina väli josta muovimassa pääsee kulkemaan ja muovautumaan. Ruuvien sijaitessa tarpeeksi kaukana toisistaan lujitekuidut säilyvät pidempinä, mikä parantaa komposiitin lujuusominaisuuksia (KUVIO 7 b). Kuviossa 7 on esitelty kaksi perustapaa ruuvien sijoittelussa. (Rauwendaal 1994, 458–459.)



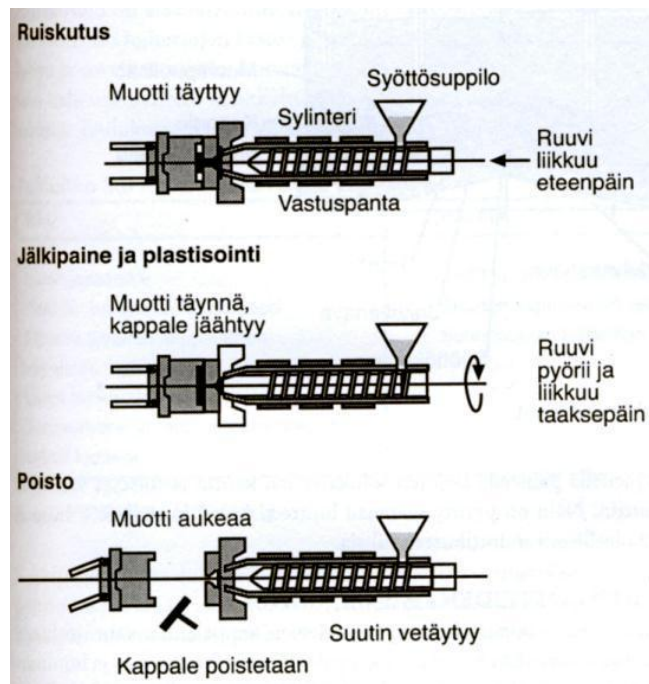
KUVIO 7. a) Ruuvit pyörivät samaan suuntaan puretuen toisiinsa b) Ruuvit pyörivät eri suuntiin kauempana toisistaan (Rauwendaal 1994, 461, 487)

3.2 Ruiskuvalu

Ruiskuvalu on tärkein kestopuovikappaleiden valmistustekniikoista. Menetelmää käytetään myös lujitettujen kesto- ja kertamuovituotteiden valmistuksessa. Lähtömateriaalina voi olla joko granulaatteja tai BMC:tä (Bulk Moulding Compound). (Saarela ym. 2007, 176) Ruiskuvalu soveltuu parhaiten pienille muodoiltaan vaihteleville kappaleille, joiden sarjakoot ovat suuria. Ruiskuvalutuotteissa voidaan käyttää lujitekuituja, kun tuotteilta vaaditaan korkeita kimmo- ja lujuusarvoja, hyvää lämmönkestoa tai alhaista lämpölaajenemista. (Saarela ym. 2007, 178).

3.2.1 Valmistusmenetelmä

Raaka-aineet syötetään syöttösuppilon kautta ruiskuvalukoneen ruuville, joka kuljettaa materiaalin eteenpäin. Ruuvin pyöriessä kitka ja lämpövastukset plastisoivat ja homogenisoivat muovin. Kun yhtä ruiskutuskertaa varten tarvittava muovisuola on kerätty ruuvin eteen, ruuvi liikkuu eteenpäin työntäen sulan massan muottiin. Ruuvin edessä olevalla sulkusuuttimmella säädellään sulan virtausta ruiskutuskanavistoon. Ruiskuvalukappaleet kovettuvat muotissa noin 20-120 sekunissa koosta riippuen. Seuraavassa kuvassa (KUVIO 8) on esitelty ruiskuvalun perusvaiheet. (Saarela ym. 2007, 176,177.)

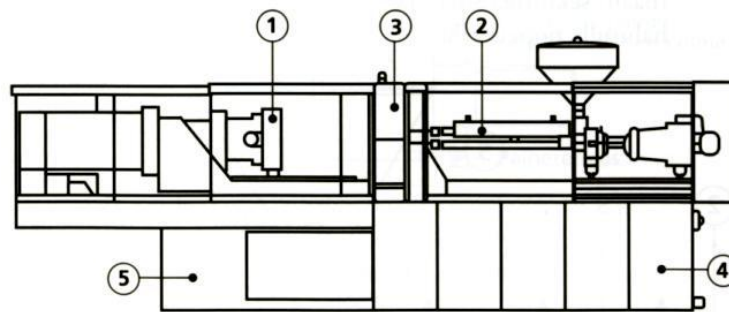


KUVIO 8. Ruiskuvalun perusvaiheet (Saarela ym. 2007, 177)

3.2.2 Ruiskuvalukone

Ruiskuvalukoneen tehtävänä on aikaansaada muotin avaus- ja sulkutoiminnot, muodostaa riittävä muottipuoliskoiden sulkuvoima, ruiskuttaa plastisoitu massa muottiin ja kerätä uusi annos seuraavaa muotin täyttämistä varten. Seuraavassa

kuvassa (KUVIO 9) on esitelty ruiskuvalukoneen pääyksiköt. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 92.)



1. Sulkuyksikkö
2. Ruiskutusyksikkö
3. Ohjausyksikkö
4. Hydrauliyksikkö
5. Runko

KUVIO 9. Ruiskuvalukoneen pääyksiköt (Kurri ym. 2008, 75)

Ruiskuvalussa muovisula ruiskutetaan muottiin suurella nopeudella. Tämän saavuttamiseksi tarvitaan riittävän suuri ruiskutusaine, joka puolestaan aiheuttaa muotin sisällä massan paineen, joka pyrkii aukaisemaan muotin. Tähän tarvitaan vastavoima, jota kutsutaan sulkuvoimaksi. Sulkuvoima määräytyy ruiskutusaineen ja muottipesän projektiopinta-alan perusteella. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 92, 93)

Ruiskuvalukoneet luokitellaan yleensä sulkuvoiman, ruiskutusaineen tai ruuvinkoon mukaan. Tavanomaisille ruiskuvalukoneille alueet ovat yleisesti seuraavat:

- sulkuvoima 200-10 000 kN
- ruiskutusaine 120-250 MPa
- ruuvinkoon halkaisija 18-120 mm

(Järvelä, Syrjälä & Vastela, 2000, 93)

3.2.3 Lujitettujen ruiskuvalukappaleiden ominaisuudet

Lujitettujen kesto- ja kertamuovien ruiskuvalu voi vaatia erilaiset ruuvit kuin lujittamattomien materiaalien ruiskuvalu. Eräänä ratkaisuna on edellä mainittujen

kaksoisruuvien käyttö, jolloin materiaali etenee riittävän kaukana toisistaan olevien ruuvien välissä. Tällä pyritään minimoimaan lujitekuitujen pilkkoutuminen, joka alentaa kappaleen lujitusominaisuuksia. Normaalisti lujitepituus ruiskuvalukappaleilla on vain noin 0,2 mm. Viime aikoina on kehitelty uusia ruiskuvalumateriaaleja, joissa kuidut saadaan säilymään noin 3-4 mm:n pituisina. (Saarela ym. 2007, 177, 178.)

Ruiskuvalussa lujitekuidut pyrkivät kääntymään virtauksen suuntaan. Tämä aiheuttaa sen, että kappaleen ominaisuudet voivat vaihdella hyvinkin paljon eripuolilta kappaletta sen muodosta riippuen. Taulukossa 4 on vertailtu lujitettujen ruiskuvalukappaleiden etuja ja haittoja. (Saarela ym. 2007, 179.)

TAULUKKO 4. Lujitettujen ruiskuvalukappaleiden edut ja haitat (Saarela ym. 2007, 178, 179)

Etu	Haitta
Lyhyt jaksoaika	Kalliit laite- ja muotti-investoinnit
Pitkälle automatisoitu prosessi	Suuten kappaleiden valmistus erittäin kallista
Monimutkaisten kappaleiden valmistus mahdollista	Suunnattujen lujitteiden käyttö ei ole mahdollista
Laaja raaka-aine valikoima	
Tasalaatuiset ja mittatoleransseiltaan vakiot	

3.3 Vetokoe

Vetokoe on muovien mekaanisten ominaisuuksien testausmenetelmä, jolla saadaan tietoa materiaalin lujuus-, sitkeys- ja jäykkyysominaisuuksilta. Testituloksia hyödynnetään mm. tuotannon laadunvarmistuksessa ja materiaalien valinnassa. Kokeessa mitataan kappaleeseen kohdistuva kuormitus ja tästä aiheutuva venymä. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 194.)

Kokeessa venytetään standardi koesauvaa pituussuunnassa vakionopeudella ja mitataan venytystä vastustava voima. Testi tehdään vähintään viidelle koekappaleelle, joista lasketaan keskiarvo. Mitatusta voimasta ja venymästä

piirturi piirtää koneelle reaaliaikaista jännitys-venymäkuvaajaa. Jännitys (σ) (Kaava 1.1) lasketaan kappaleen murtumiseen tarvittavan voiman (F) ja kappaleen alkuperäisen poikkipinta-alan (A) avulla. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen, 2008, 195.)

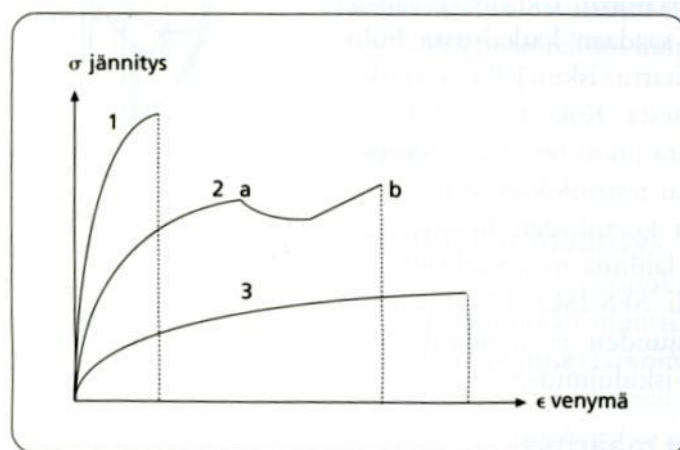
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{KAAVA 1.1}$$

Koekappaleen venymä (ϵ) saadaan laskettua merkkiviivojen välisen etäisyyden avulla (KAAVA 1.2) pituuden muutoksen (ΔL_0) suhteesta alkuperäiseen pituuteen (L_0) (Kurri, Malén, Sandell, Virtanen, 2008, 195).

$$\epsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad \text{KAAVA 1.2}$$

Jännitys-venymäkuvaajan (KUVIO 10) suoralta alkuosalta voidaan määrittää materiaalin vetokimmokerroin eli kimmomoduuli (E_T) (KAAVA 1.3), jossa σ_1 on jännitys määritettynä venymän arvolla $\epsilon_1=0,0005$ ja σ_2 on jännitys määritettynä venymän arvolla $\epsilon_2=0,0025$. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 195.)

$$E_T = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad \text{KAAVA 1.3}$$



KUVIO 10. Jännitys-venymäkuvaaja. 1) hauras- ja kovamuovi 2) sitkeä- ja kovamuovi 3) sitkeä- ja haurasmuovi (Kurri ym. 2008, 195.)

4 Muovien ja muovikomposiittien hitsaus

4.1 Yleistä

Muovien hitsauksella tarkoitetaan materiaalien liittämistä lämmön ja paineen avulla. Hitsaus voidaan tehdä lisääineen kanssa tai ilman sitä. Liitettävät pinnat lämmitetään, jolloin muovi pehmenee. Pehmenneet pinnat puristetaan yhteen, jolloin molekyyliketjut puristuvat lomittain ja materiaalit sekoittuvat. Lämpötilan laskiessa liitospinnat tarttuvat yhteen eli hitsaantuvat. (Kurri ym. 2008, 178.)

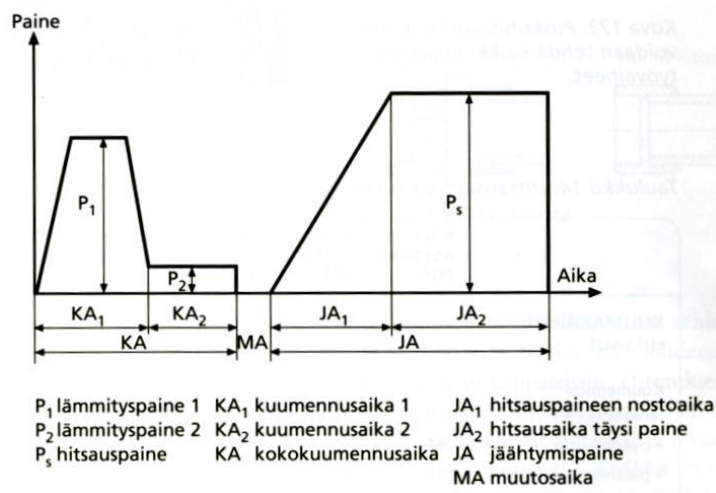
Yleisesti muovien hitsauksessa käytetty lämpötila-alue on 200–300°C, mutta korkeampiakin lämpötiloja käytetään. Koska muoveilla ei ole selvää sulamispistettä puhutaan lämpötila-alueesta jolla tarkoitetaan aluetta, jossa muovien sulaminen tapahtuu. Hitsaus on helpompaa niillä muoveilla, joilla on kapea lämpötila-alue. Oikea hitsauslämpötila on oleellinen hitsaussauman lujuuden kannalta, koska liian alhaisilla lämpötiloilla ei tapahdu riittävästi pehmenemistä ja puolestaan liian korkeilla lämpötiloilla molekyyliketjut katkeilevat ja sulaneet pinnat hapettuvat. Molemmat tapaukset alentavat hitsin lujuutta. Hitsattavat pinnat on puhdistettava mekaanisesti tai sopivalla lämpökäsittelyllä ennen hitsausta, koska muovin pinnalla voi olla jäämiä voiteluaineista, irrotusaineista ym. varastoinnin aikana tulleista epäpuhtauksista. Kaikki epäpuhtaudet alentavat hitsin laatua. (Saarela ym. 2003, 174.)

4.2 Hitsausmenetelmät

Muovikomposiittien hitsaukseen soveltuvat samat hitsausmenetelmät kuin muovienkin hitsaukseen. Käytetyimpiä menetelmiä ovat ultraäänihitsaus, puskuhitsaus ja kitkahitsaus. (Sercer & Raos 2012, 9.) Komposiittien lujitepitoisuudet vaikuttavat hitsauslaatuun siten, että lujitepitoisuuden kasvaessa hitsauslujuus laskee (Koto & Tiisala 2004, 7).

4.2.1 Puskuhitsaus (Peilihitsaus)

Puskuhitsaus on muovikappaleiden päittäisliitosmenelmä, jota käytetään yleensä putkien ja levyjen hitsaukseen. Ennen hitsausta hitsattavat pinnat oikaistaan ja puhdistetaan. Näin pinnoilta poistuu mahdolliset epäpuhtaudet ja hapettumat, ja pinnat saadaan yhdenmukaisiksi. Pinnat puristetaan kuumennuselementtiä vasten kunnes pinnat sulavat. Tämän jälkeen elementti poistetaan ja sulaneet pinnat puristetaan yhteen, kunnes ne ovat jäähtyneet. Kuviossa 11 on kuvattu peilihitsauksen paineen muodostumista prosessin aikana. (Kurri ym. 2008, 180, 181.)



KUVIO 11. Puskuhitsauksen paineen muodostus hitsauksen aikana (Kurri ym. 2008, 180, 181)

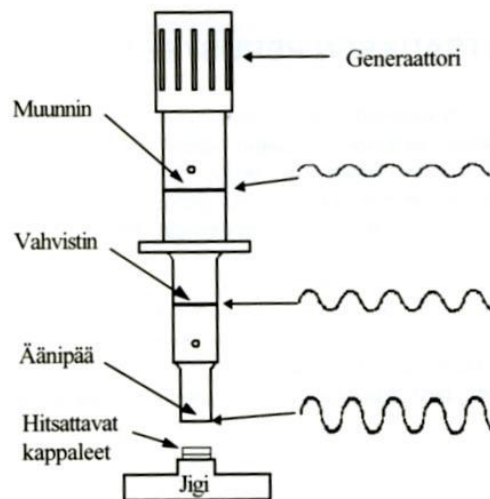
Hitsauskoneen käyttö varmistaa hyvän hitsaustuloksen, koska siinä kappaleet eivät pääse liikkumaan hitsauksen aikana. Muovien huonon lämmönjohtavuuden vuoksi lämmitysaika tulee olla riittävän pitkä, jotta kappaleet ehtivät sulamaan tarpeeksi syvältä. Elementin poistaminen on suoritettava nopeasti, etteivät hitsauspinnat pääse hapettumaan. (Kurri ym. 2008, 181.)

4.2.2 Ultraäänihitsaus

Ultraäänihitsauksessa käytetty mekaaninen värähtely tuotetaan verkkovirrasta erilaisten muunnosprosessien kautta. Hitsauskoneen generaattori muuttaa matalataajuuksisen (50–60 Hz) vaihtovirran korkeataajuisiksi (20 kHz)

vaihtovirraksi. Korkeataajuksinen vaihtovirta synnyttää muuntimessa vaihtelevan sähkökentän, jonka vaikutuksesta sähkökentässä olevat pietsokeraamit alkavat liikkua vaihtelevan sähkökentän tahdissa. Syntynttä mekaanista värähtelyä voidaan muokata tarvittaessa vahvistimella. Vahvistimella voidaan muuttaa syntyneen amplitudin pituutta tai siirtää vain värähtelyä eteenpäin.

Värähtelyaallon amplitudia voidaan edelleen muokata äänipään avulla hitsaukseen sopivaksi. Värähtelyjen muunnosprosessi on esitelty kuviossa 12. (Rakkola 2003, 11.)



KUVIO 12. Ultraäänihitsauslaitteen värähtelyjen muunnosprosessi (Rakkola 2003, 12).

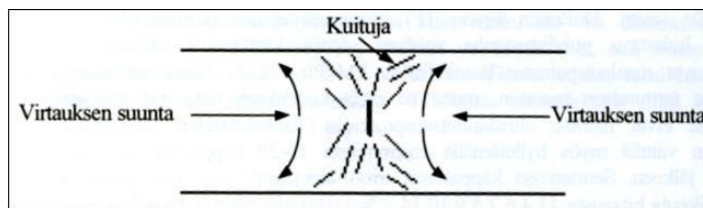
Hitsauksen alussa äänipää laskee kiinni hitsattavaan kappaleeseen puristaen tätä jigä vasten. Paine nousee tasaisesti säädettyyn maksimiarvoon, jossa se pysyy hitsauksen loppuun asti. Ennen kuin paine saavuttaa maksimin, kytkeytyy ultraääni päälle. Ultraääni on päällä kunnes liitospinnat ovat sulaneet. Liitoksen synnyttyä ultraääni kytkeytyy pois päältä, mutta puristus jatkuu, jolloin kappale pääsee jäähtymään. Sauman muodostuttua äänipää nousee yläasentoon.

Ultraäänihitsauksen edellytyksenä on materiaalin plastisoituminen, joten menetelmä soveltuu vain kestumuovien hitsaukseen. Parhaiten hitsaus onnistuu samasta materiaalista olevien kappaleiden kesken. (Rakkola 2003, 12.)

4.2.3 Kuitupitoisuuden vaikutus hitsaukseen

Komposiitit pystyvät kuljettamaan värähtelyä paremmin suuremman jäykkyyden vuoksi, mutta vain tietyillä täyttöasteilla hitsaantuvuus paranee. Hitsaussauman lujuus riippuu lisätyn kuidun määrästä. Alhaisilla, alle 30 %:n kuitupitoisuuksilla saavutetaan parempia hitsaustuloksia. Täyttöasteen noustessa yli 35 %:n, ei matriisimateriaalia ole enää tarpeeksi, jotta voitaisiin saavuttaa luotettavia saumoja. (Rakkola 2003, 105.)

Ruiskuvalun aikana syntyvät yhtymäsaumat voivat erityisesti täytetyillä ja lujitetuilla materiaaleilla muodostua ongelmaksi, sillä ruiskutuksen aikana kuidut kääntyvät kohtisuoraan ruiskutuksen suuntaa vastaan (KUVIO 13). Tällöin yhtymäsauman poikki ei mene kuituja ja tuotteeseen syntyy epäjatkuvuuskohta, joka voi toimia hitsausenergian keskittimenä vähentäen siten saumaan menevän energian määrää. (Rakkola 2003, 106.)



KUVIO 13. Kuidut kääntyvät poikittain virtaussuuntaan nähden eivätkä muodosta liitoksia hitsausauman yli (Rakkola 2003, 106).

4.2.4 Muita muovien ja muovikomposiittien hitsausmenetelmiä

Puskuhitsauksen ja ultraäänihitsauksen lisäksi yleisimpiä muovien ja muovikomposiittien hitsausmenetelmiä ovat kitkahitsaus, kuumakaasuhitsaus, ekstruusiohitsaus ja laserhitsaus. Menetelmät ovat esitelty seuraavassa taulukossa (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5. Muovien ja muovikomposiittien hitsausmenetelmät (Rakkola 2003, 8; Kurri ym. 2008, 175-179).

Menetelmä	Periaate	Edut	Haitat	Millaisille kappaleille?
Kitkahitsaus	Toinen liitettävistä kappaleista pyörii tai tekee värähtelevää liikettä kiinteästi tuettua kappaletta vasten, joka saa aikaan liitoksen.	Saavutetaan luja ja tiivis hitsaussauma. Voidaan hitsata isompia kappaleita kuin ultraäänellä. Menetelmä soveltuu suurille sarjoille.	Ultraäänihitsauksen verrattuna laitteisto on kalliimpi ja jaksoaika pidempi.	Samantyyppisille kappaleille, kuin ultraäänihitsaus. Voidaan hitsata myös vähän isompia kappaleita.
Kuumakaasu-hitsaus	Kuuma ilma puhalletaan suuttimen läpi hitsauskohtaan siten, että sekä perusaine ja lisäaine pehmenyvät.	Soveltuu useimmille muoveille ja hitsaussauma on luotettava.	Hitsauksen laatu riippuu hitsaajan ammattitaidosta. Tyypillisiä hitsausvirheitä ovat, reunahaavat, ilmahuokokset sekä juurivirheet.	Soveltuu erimuotoisille muovikappaleille.
Ekstruusio-hitsaus	Lisäaine sulatetaan sähkövastuksien ja ruuvin avulla sylinterissä, josta sula massa puristetaan sulakkeen kautta hitsattavaan kohtaan.	Soveltuu erityisesti paksujen kappaleiden hitsaukseen. Sopii kaiken muotoisille kappaleille. Hitsausauma on paksumpi kuin kuumakaasuhitsauksessa. Menetelmän etuna on nopeus suurten railojen hitsauksessa.	Hitsauksen laatu riippuu hitsaajan ammattitaidosta.	Soveltuu erimuotoisille muovikappaleille ja paksujen kappaleiden hitsaukseen.
Laserhitsaus	Lasersäde ohjataan hitsaamaan, jolloin liitospinnat kuumenevat ja kappaleet liittyvät toisiinsa.	Menetelmän etuina on tarkka hitsaus, kappaleen koskematon lämmitys ja purseeton sauma.	Laitteisto on kallis ja vaatimukset kappaleiden mittatarkkuudelle ovat suuret.	Soveltuu siistiä ja tarkkaa hitsaussaumaa vaativille kappaleille. Elektroniikka ja autoteollisuuden sovelluksiin.

5 Teollinen koesuunnittelu

5.1 Yleistä

Tässä työssä päädyttiin käyttämään teollista koesuunnittelua, koska sen avulla saatiin selville vaikutusvaltaisimmat ohjaustekijät sekä päästiin huomattavasti pienemmällä koemäärällä.

Teollinen koesuunnittelu, josta käytetään myös lyhenettä DOE (Design of Experiment) perustuu maataloudessa ja lääketieteessä suoritettuun kehitystyöhön, jonka R.A. Fisher aloitti jo vuonna 1920. Nykyään eri aloilla ja alueilla tehtävät kokeet ja kokeiden tavoitteet ovat eriytyneet. (Karjalainen 1992, 9.)

Karjalainen (1992) erittelee teollisen kokeen erityispiirteet seuraavasti:

1. Teollisessa kokeessa on pystyttävä erottelemaan vaikuttavat tekijät ei-vaikuttavista tekijöistä.
2. Teollisessa kokeessa on käsiteltävä suurta määrää tekijöitä (>50) ja suurta määrää vasteita (>10) samanaikaisesti. Päätehtävänä on saada aikaan haluttu (prosessi) funktio. Toissijaisena tavoitteena on keksiä, miksi asiat tapahtuivat niin kuin ne tapahtuivat. Asioiden yksinkertaistaminen ei ole mahdollista.
3. Kokeen analyysien on oltava sopivia:
 - Tulosten on oltava ymmärrettäviä
 - Tulosten on oltava sellasia, että ne voidaan kertoa organisaatiossa ja organisaatiolle.
 - Analyysi ei saa viedä liian paljon aikaa eikä se saa vaatia liian paljon kokemusta tai tietämystä tilastomatematiikasta.
 - Analyysien pitää pystyä poimimaan tuloksista oleellinen tieto.

Teollisen kokeen haluttu lopputulos vaikuttaa myös itse kokeen suunnitteluun, suorittamiseen ja analyysiin. Esimerkiksi jos tutkimuskohteena on tuotannon

hävikki, tulisi keskittyä niihin asioihin, mitkä vaikuttavat vain tähän eikä tutkia niitä mitkä vaikuttavat prosessin tehokkuuteen. (Karjalainen 1992, 9,10.)

5.2 Tagutchi-menetelmä

Tagutchi-menetelmä on sekä tapa ajatella että menetelmä. Siinä suunnitellaan ja suoritetaan joukko pienimuotoisia kokeita, joiden avulla löydetään tehokkaat ratkaisut tuotannon ongelmiin ja voidaan taata tuotteen toimivuus markkinoilla. Tagutchi-menetelmän tavoitteena on minimoida hävikin syntyä. Optimoinnissa käytetään hyväksi insinööri- ja tilastotekniikkaa. (Karjalainen 1992, 12.) Tohtori Genichi Taguchin laatufilosofian ydin on laadun määritelmä:

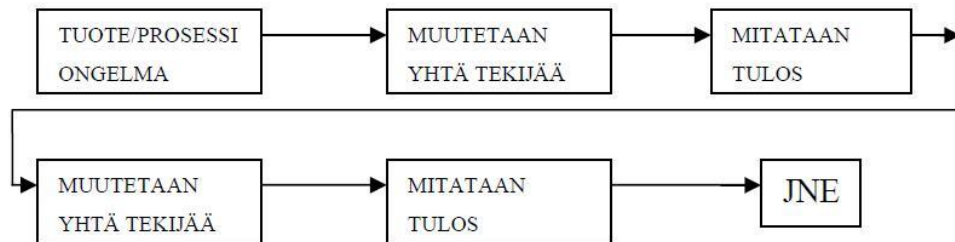
”Tuotteen laatu on tuotteen pienin mahdollinen kokonaishävikki, jonka tuote aiheuttaa yhteisölle sen jälkeen, kun se on lähetetty tuotantolaitoksesta.” – Genichi Taguchi (Karjalainen 1992, 11.)

Taguchin kehittämä kokeellinen menetelmä perustuu ortogonaalimatriiseihin, joilla saadaan selville päätekijöiden vaikutukset ja voidaan testata niiden additiivisuutta eli yhteenlaskeutuvuutta. Additiivisuustestaus on tärkein syy käyttää ortogonaalimatriiseja, koska niillä voidaan eliminoida tekijöiden keskinäisvaikutukset. Teollisuudessa parametrien keskinäisvaikutuksella tarkoitetaan häiriötä eli kohinaa. (Karjalainen 1992, 20.)

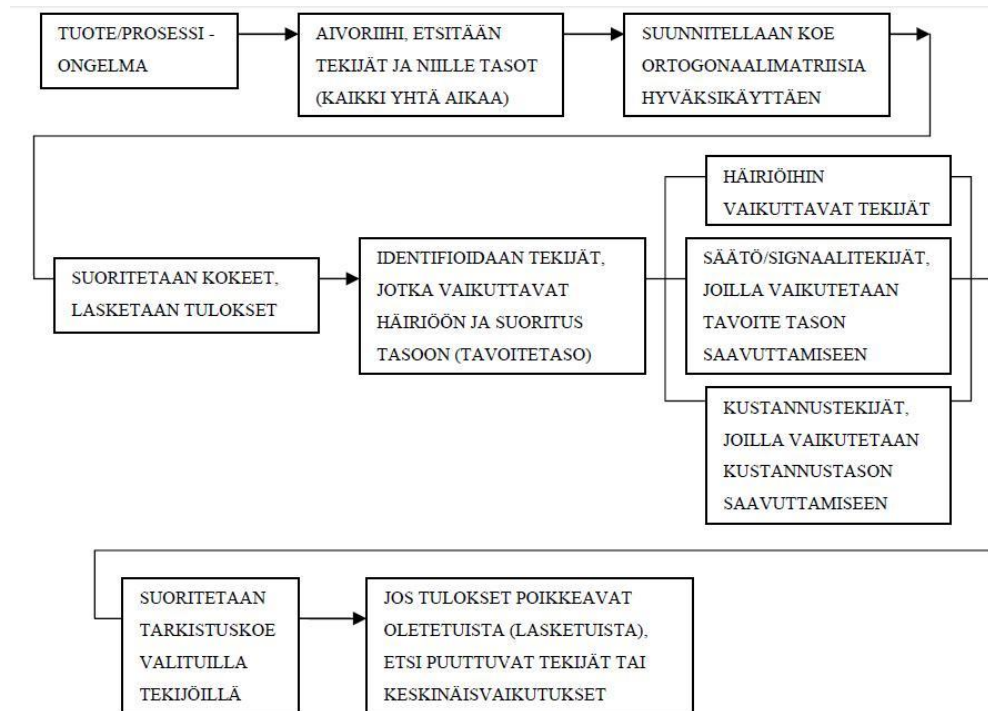
Merkittävin ero perinteiseen koesuunnitteluun on siinä, että Tagutchi-kokeissa ortogonaalimatriisia käytetään varmistamaan parametrien vaikutus myös muissa kuin koeolosuhteissa (tuotannossa, markkinoilla) (Karjalainen 1992, 12). Toinen keskeinen ero on Tagutchi-menetelmässä käytetty signaali-kohinasuhde (S/N-suhde), joka toimii menetelmässä laadun indeksinä. Signaalin eli suoritusarvon parantaminen on yhtä tärkeää kuin vaihtelun pienentäminen. Vastaavaa tekniikkaa ei käytetä muissa kokeellisissa menetelmissä. Yhdellä menetelmällä voidaan parantaa suoritusarvoa ja toisella pienentää vaihtelua, mutta Tagutchi-menetelmässä nämä voidaan tehdä samanaikaisesti. (Karjalainen 1992, 13.)

5.2.1 Parametrisuunnittelu

Parametrisuunnittelu on Taguchi- menetelmän tärkein ja keskeisin osa. Siinä suunnittelija etsii ja valitsee parametrien parhaat kombinaatiot varsinaisia kokeita varten. Parametrisuunnittelussa tuotteesta pyritään tekemään mahdollisimman vahva (robusti) olosuhteiden vaihteluita ja muita häiriöitä vastaan. (Tötterström, Mäenpää, Villanen 2011, 8.) Tämän lisäksi tuotteen suoritusarvo pyritään maksimoimaan ja kustannukset minimoimaan (karkeimmat ja halvimmat komponentit). Vaihtelua (hävikkiä) pienennetään ilman, että pyritään poistamaan vaihtelun syytä, koska syyn poistaminen on kallista. (Karjalainen 1992, 16, 17) Seuraavassa on esitelty perinteisen koesuunnittelun tapa ratkaista ongelma (KUVIO14) ja Taguchi-menetelmä tapa ratkaista ongelma (KUVIO 15).



KUVIO 14. Perinteinen koesuunnittelun ongelmanratkaisumalli (Karjalainen 1990, 47).



KUVIO 15. Taguchi- menetelmän ongelmanratkaisumalli (Karjalainen 1990, 47).

5.2.2 Parametrit

Parametrit ovat tekijöitä, jotka aikaansaavat toiminnon ja/tai siihen liittyvän häiriön (KUVIO 16). Taguchi jakaa parametrit neljään ryhmään: (Karjalainen 1990, 48.)

1. Signaalitekijät, jotka käyttäjä asettaa halutessaan prosessista tai koneesta tietyn ulostulon. Joskus voidaan käyttää useampaa signaalitekijää samanaikaisesti, esimerkiksi karkea- ja hienosäätöä.
2. Ohjaustekijät ovat suunnittelijan asettamia parametri arvoja. Jokaiselle ohjaustekijälle voidaan asettaa useita arvoja eli tasoja.
3. Skaalaus- eli tasotekijät ovat ohjaustekijöiden erikoistapaus. Niillä voidaan helposti säätää yhteys signaalitekijän ja ulostulon välille.
4. Häiriö- eli kohinatekijät eroavat edellisistä siten, että niitä ei voida ohjailta. Häiriötekijät vaikuttavat ulostuloon ja niiden taso vaihtelee tuotteesta ja olosuhteesta toiseen sekä ajan suhteen. Vain häiriöiden

(TAULUKKO 6), että tasojen (1 & 2) lukumäärä on sama jokaisessa sarakkeessa, mutta ne ovat eri järjestyksessä. Eri ortogonaalimatriiseilla voi olla eri määrä tasoja, mutta sama sääntö toteutuu niilläkin (TAULUKKO 6). (Peace 1992, 115.)

TAULUKKO 6. Ortogonaalimatriisi $L_8(2^7)$ (Karjalainen 1992, 21).

KOE- NUMERO	TEKIJÄ							KOE- TULOS
	A	B	C	D	E	F	G	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8

Ortogonaalisista sarakkeista seuraa kokeiden tulosten toistuvuus. Silloin kun sarakkeet ovat ortogonaalisia toisiinsa nähden ja tietyn parametrin tulos yhdellä tasolla on paljon suurempi kuin toisella tasolla, tarkoittaa se sitä, että parametrin tason muutoksella on vahva vaikutus mitattavaan laatuominaisuuteen. (Peace 1992, 115.)

Taulukossa (TAULUKKO 7) on esitelty kaikki käytössä olevat ortogonaalimatriisit. Ortogonaalimatriisien etuja ovat erityisesti se, että pienellä koemäärällä voidaan tarkastella suurta joukkoa tekijöitä. Voidaan osoittaa, että ortogonaalimatriiseilla voidaan saavuttaa yli 90-prosenttisesti sama tulos, mikä saavutetaan, kun kaikki yhdistelmät tutkitaan. Esimerkiksi käytettäessä L16-matriisia (TAULUKKO 7) saavutetaan 16 kokeella 90-prosenttisesti sama tulos kuin 32768 kokeella. (Karjalainen 1992, 22.)

TAULUKKO 7. Ortogonaalimatriisit (Karjalainen 1992, 22)

L-matriisi	Tekijöitä	Tasoja	L (kokonaismäärä) (orthogonal)	Kaikki mahdollisuudet (full factor)
L4	3	2	4	8
L8	7	2	8	128
L9	4	3	9	81
L12	11	2	12	2048
L16	15	2	16	32768
L18	1	2		
L18	7	3	18	4374
L27	13	3	27	1594323
L36	11	2		
L36	12	3	36	> 1000 milj.

Ortogonaalin haittapuolia ovat esimerkiksi se, että laatuominaisuutta (y) on mitattava kohtuullisen tarkkaan ja tekijöiden keskinäisvaikutukset saattavat ”harhauttaa” analyysin tulosta. Tulokset varmistetaan tarkastuskokeella viimeiseksi. (Karjalainen 1992, 22.)

5.3.2 Signaali-kohinasuhde (S/N)

Signaali-kohinasuhdetta käytetään laadun mittarina. Sen avulla yritetään löytää parhaat parametrit, joilla saavutetaan tuotteen tai prosessin maksimaalinen suoritusarvo ja samalla minimoidaan kustannukset sekä häiriöiden vaikutus toimintaan. Tagutchi-menetelmässä oleellista on, että kokeiden aikana saadaan vaihtelua, jossa tuote tai prosessi tulee toimimaan. Kokeet analysoidaan laskemalla jokaiselle kokeelle signaali-kohinasuhde. Lauseke riippuu siitä, mihin sillä pyritään eli mikä on tavoite tulos (KAAVAT 1.4, 1.5 ja 1.6) (karjalainen 92, 22, 23, 24).

1. Suurempi on parempi

$$S/N \text{ (dB)} = -10\log[1/n\sum(1/y_i^2)] \text{ KAAVA 1.4}$$

jossa y1, y2, y3 jne. ovat yhden kokeen tuloksia ja n on koetoistojen määrä.

2. Pienempi on parempi

$$S/N \text{ (dB)} = -10\log[1/n\sum(y_i^2)] \quad \text{KAAVA 1.5}$$

jossa y_1, y_2, y_3 jne. ovat yhden kokeen tuloksia ja n on koetoistojen määrä.

3. Tavoitearvo on paras

$$S/N \text{ (dB)} = -10\log [Y_{av}^2/s^2 - 1/n] \quad \text{KAAVA 1.6}$$

jossa Y_{av} on mitattaustulosten keskiarvo, s on otosstandardipoikkeama ja n on koetoistojen määrä.

5.4 Datanalysointi

Koetuloksista lasketaan summastatistiikka signaali-kohinasuhteesta (S/N-suhte) (KAAVA 1.4–1.6) ja keskiarvot koesarjojen väliltä. Seuraavaksi laaditaan vastetaulut S/N-suhteelle (TAULUKKO 8) ja keskiarvolle (TAULUKKO 9) (Vastetaulukoita käsitellään tarkemmin Kokeiden suoritus-osiossa, sivut 41–46). (Karjalainen, 1992, 29)

TAULUKKO 8. S/N-suhteen vastetaulu (Karjalainen 1992, 29).

S/N-vastetaulu											
Tekijä											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Taso 1	20,26	18,39	20,83	22,67	20,85	22,80	17,93	24,05	20,06	23,13	24,71
Taso 2	20,54	22,41	19,96	18,12	19,95	17,99	22,86	16,74	20,74	17,66	16,08
Ero	0,28	4,02	0,87	4,55	0,9	4,81	4,93	7,31	0,68	5,47	8,63
Järjestys	11	7	9	6	8	5	4	2	10	3	1
Suositus	A2	B2	C1	D1	E1	F1	G2	H1	I2	J1	K1

Signaali-kohinasuhteen vastetaulukko (TAULUKKO 8) kertoo hajonnan kannalta suotuisimman parametrijhdistelmän. Keskiarvon vastetaulukko (TAULUKKO 9) puolestaan kertoo tutkittavan suureen kannalta suotuisimman parametrijhdistelmän.

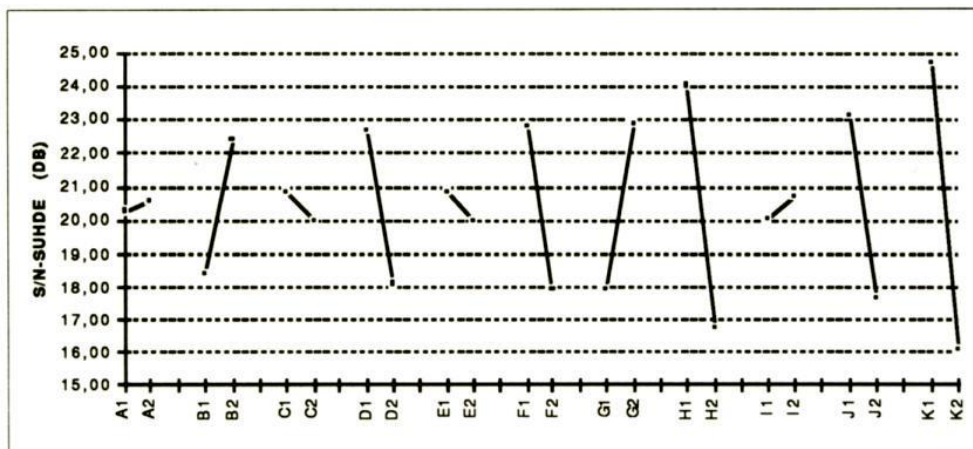
TAULUKKO 9. Keskiarvon vastetaulu (Karjalainen 1992, 29).

Keskiarvo-vastetaulu											
Tekijä											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Taso 1	2,79	2,33	2,35	2,58	2,40	1,78	2,43	2,02	2,43	2,31	2,53
Taso 2	2,02	2,48	2,45	2,23	2,40	3,02	2,38	2,79	2,38	2,49	2,28
Ero	0,77	0,15	0,10	0,35	0,00	1,24	0,05	0,77	0,05	0,18	0,25
Järjestys	2	7	8	4	11	1	9	3	9	6	5
Suositus	A1	B2	C2	D1	E2	F2	G1	H2	I1	J2	K1

Taulukoista havaitaan, että eri tekijät vaikuttavat hajontaa (S/N-suhteeseen) ja eri tekijät keskiarvoon.

Vastetaulukot voidaan esittää myös graafisina vastekuvaajina (TAULUKKO 10), jossa parametrien tasojen vastepisteet yhdistetään viivalla. Viivan pituus kertoo, kuinka suuri vaikutus kyseisellä parametrilla on koetuloksiin.

TAULUKKO 10. S/N suhteen vastekuvaaja (Karjalainen, 1992, 30).



Tulosten perusteella valitaan seuraavaksi optimi tarkastuskokeeseen niin, että hajonta on mahdollisimman pieni ja mitattava suure kuitenkin riittävän hyvä. (Karjalainen, 1992, 29)

5.5 Tarkastuskoe

Tarkastus- eli konfirmaatiokoe on keskeinen teollisuuskokeissa, ja se on yhtä tärkeä kuin ortogonaalimatriisin yksittäinen koe. Se joko vahvistaa tai hylkää

additiivisuuden. Tarkastuskokeen hyvä tulos on sellainen, jossa tulos ei vastaa ennustetta. Tällöin kokeesta saadaan jotain uutta informaatiota ja estetään epäkypsän suunnitelman pääsy eteenpäin. (Karjalainen, 1992, 74.)

Lähteet

Kirjalähteet:

Järvinen P. 2000. Muovin suomalainen käsikirja. Porvoo. Muovifakta.

Saarela O., Airasmaa I., Kokko J., Skrifvars M., Komppa V. 2007.
Komposiittirakenteet. Helsinki: Muoviyhdistys.

Kurri V., Malén T., Sandell R., Virtanen M. 2008. Muovitekniikan perusteet.
Helsinki: Opetushallitus

Seppälä J. 2003. Polymeeritekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto Oy

Fabrin P., Vuorinen J. 10/2004. Luonnonkuitulujitteinen polypropeeni.
Tampereen teknillinen yliopisto. Muovi ja elastomeeritekniikka. Raportti.

Peace G. S. 1992. Taguchi Methods- A Hands-On Approach. Massachusetts:
Addison-Wesley Publishing Company.

Karjalainen E. E. 9/1992. Teollinen koesuunnittelu. Helsinki: Metalliteollisuuden
Kustannus Oy.

Karjalainen E. 1990. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelussa. Helsinki:
Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

Koto T., Tiisala S. 2004. Muovi + puu- Puukuitulujitteiset muovikomposiitit.
Lahti: Lahden ammattikorkeakoulun julkaisu, Sarja A Tutkimuksia, osa 7.

Rakkola P. 2003. Muovien ultraäänihitsaus. Tampere: Plastdata Oy.

Järvelä P., Syrjälä K., Vastela M., 2000. Ruiskuvalu. Tampere: Plastdata Oy

Rauwendaal C. 1994. Polymer Extrusion. München, Vienna, New York: Carl
Hanser Verlag.

Sähköiset lähteet:

Koleva M., Gaprovo, Bulgaria: Technical University of Gaprovo; Käännös:
Nykänen S. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto. [viitattu 19.12.2012].

Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PP_FL.pdf

UPM ProFi 2011a. Innovatiivinen raaka-aine. [viitattu 19.12.2012]. Saatavissa:

<http://www.upmprofi.com/fi/materiaali/raaka-aine/Pages/default.aspx>

UPM ProFi 2011b. Hyvä kulutuksen ja värien kesto. Lahti: UPM ProFi. [viitattu
19.12.2012]. Saatavissa:

<http://www.upmprofi.com/fi/materiaali/ominaisuudet/Pages/default.aspx>

UPM ProFi 2011c. UPM ProFi Deckin tekniset ominaisuudet. [viitattu

19.12.2012]. Saatavissa: <http://www.upmprofi.com/fi/tuotteet/deck/tekniset-tiedot/Pages/default.aspx>

Suomen standardoimisliitto SFS ry. SFS, EN, ISO? [viitattu 19.12.2012].

Saatavissa: http://www.sfs.fi/julkaisut_ja_palvelut/standardi_tutuksi/sfs_en_iso

Sercer M., Raoss P. 2012. Joining plastic and composites. [viitattu 11.10.2012]

Saatavissa: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-171-07-00.pdf>

Vienamo T., Nykänen S. 2013. Muovien hitsaus. [viitattu 18.8.2012]. Saatavissa:

<http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/153/217/>

Toissijainen lähde: Tötterström J., Mäenpää M., Villanen H. 2011. Teollinen
koesuunnittelu ja FMEA, TTY [viitattu 14.9.2012, 5.2.2013] Saatavissa:

www.fmeainfocentre.com/foreign%20language/FinsFMEA.doc

