



Timo Annunen

SELVITYS PIKAVALMISTUKSEN KÄYTÖSTÄ PROTOMUOTTIVALMISTUKSESSA

SELVITYS PIKAVALMISTUKSEN KÄYTÖSTÄ PROTOMUOTTIVALMISTUKSESSA

Timo Annunen
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Timo Annunen

Opinnäytetyön nimi: Selvitys pikavalmistuksen käytöstä
protomuottivalmistuksessa

Työn ohjaaja: Esa Kontio

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2012 Sivumäärä: 43 + 1 liite

Tässä insinööriyössä selvitettiin Hydnum Oy:lle pikavalmistustekniikoiden soveltuvuutta prototyyppimuottien valmistukseen. Muotteja käytetään reaktioruiskuvalumenetelmällä valmistettavien polyuretaanimattojen valmistukseen. Sarjatuotteiden valmistuksen lisäksi esiintyy ajoittain tarve yksittäisten tuotteiden valmistukselle, mikä on nykyisellä muottitekniikalla suurten kustannusten vuoksi kannattamatonta. Nykyisistä ainettalisäävistä pikavalmistustekniikoista kartoitettiin valmistusprosessin asettamien kriteerien perusteella paras pikavalmistustekniikka ja kyseisellä tekniikalla valmistetun prototyyppimuotin kustannukset.

Parhaiten soveltuvaa pikavalmistustekniikkaa valittaessa karsittiin ensin pois ne laitteet, jotka käyttävät valmistuksessa muuta kuin metalli- tai muovilaatuja. Tämän lisäksi pois karsiutuivat laitteet, joilla valmistettavien kappaleiden koot ovat alle 500 x 500 x 500 mm. Alustavan karsinnan läpäisseistä laitteista paras valittiin kolmen valintakriteerin perusteella, jotka olivat kappalekoko, pinnanlaatu ja valmistuskustannukset.

Selvitystyön tuloksena muottien valmistukseen parhaiten soveltuvaksi tekniikaksi valikoitui Materialisen Mammoth SLA -tekniikka, jolla voidaan valmistaa riittävän suuria ja mittatarkkoja kappaleita. Kyseisellä tekniikalla valmistettavien muottikuorten todettiin soveltuvan mattojen pintaosan valmistuksen lisäksi myös mattoihin lisättävän eristekerroksen valmistukseen.

Asiasanat: pikavalmistus, reaktioruiskuvalu (RIM), polyuretaani

ALKULAUSE

Haluan kiittää Hydnum Oy:n toimitusjohtaja Erkki Mäkäräistä mielenkiintoisen opinnäytetyöaiheen tarjoamisesta. Kiitokset kuuluvat myös teknistä asiantunte-
musta antaneille henkilöille, laatu- ja tuotekehityspäällikkö Juho Andelinille, tuo-
tantopäällikkö Tero Lähetkankaalle ja tuotantoinisinööri Antti Lassilalle. Erityis-
kiitokseni osoitan opinnäytetyöni ohjaavalle opettajalle, lehtori Esa Kontiolle.

Oulussa 16.5.2012

Timo Annunen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
SANASTO	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Hydnum Oy	8
1.2 Työn tavoite	8
2 REAKTORUISKUVALU	10
2.1 Korkeapaine-RIM	11
2.2 Polyuretaani	14
2.3 Irrotusaine	15
3 MUOTILTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET	16
3.1 Lujuustekniset ominaisuudet	16
3.2 Valmistustarkkuus	16
3.3 Lämmönkestävyys	17
3.4 Kulutuskestävyys	17
3.5 Pinnanlaatuvaatimukset	18
3.6 Valmistettavuus	18
3.7 Valmistuskustannukset	18
4 TUNNETTUJA PROTOMUOTTITEKNIIKOITA	19
4.1 Lujitemuovimuotit	19
4.2 Metalloidut muottikuoret	20
5 PROTOTYYPPIMUOTIN RAKENNE	21
6 PIKAVALMISTUSTEKNIIKAT	23
6.1 Valmistuksessa tarvittava geometriatieto	23
6.2 Nestemäistä materiaalia käyttävät tekniikat	25
6.3 Kiinteää materiaalia käyttävät tekniikat	26
6.4 Jauhemaista materiaalia käyttävät tekniikat	28
7 LAITTEIDEN KARSINTA	30

8 VALINTAKRITEERIT	32
8.1 Pinnanlaatu	32
8.2 Kappalekoko	33
8.3 Muottikuoren valmistuskustannukset	33
9 TEKNIIKAN VALINTA	35
10 PIKAVALMISTUSTEKNIIKOIDEN SOVELTUVUUS VAAHDOTUSMUOTIN VALMISTUKSEEN	36
11 PROTOTYYPPIMUOTIN KUSTANNUSARVIO	39
12 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	42
LIITTEET	
Liite 1 Tarjouspyyntöjen tulokset	

SANASTO

3D-CAD	3D Computer-Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
FDM	Fused Deposition Modeling, sulaa pursoittava mallinnus
NC	Numerical Control, numeerisesti ohjattu
PUR	Polyurethane, polyuretaani
RIM	Reaction Injection Molding, reaktioruiskuvalu
SLA	Stereolithography Apparatus, stereolitografialaite

1 JOHDANTO

1.1 Hydnum Oy

Hydnum Oy on Muhoksella toimiva osakeyhtiö, joka valmistaa ääneneristys- ja sisustusmattoja maailman johtaville hyötyajoneuvojen valmistajille. Yrityksen päätuotteena ovat reaktioruiskuvalumenetelmällä valmistetut polyuretaanimatot. Polyuretaanimatot koostuvat kiinteästä ja joustavasta pintaosasta sekä maton alapinnalle lisättävästä vaahtokerroksesta. Polyuretaanista valmistettu vaahtokerros toimii tehokkaana lämmöneristeenä ajoneuvon rungon ja maton pintaosan välillä. Perinteisen kumin sijaan polyuretaanin käyttö valmistusmateriaalina mahdollistaa mm. tekstiilien integroinnin, inserttiosien käytön sekä tuotteelle yksilöidyt kuviointit ja värivaihtoehdot. Nämä lisäominaisuudet yhdistettyinä polyuretaanin hyviin perusominaisuuksiin tuovat ajoneuvojen ohjaamoihin laatua ja viihtyvyyttä. (1.)

1.2 Työn tavoite

Tässä selvitystyössä tutkitaan ainetta lisäävien pikavalmistustekniikoiden soveltuvuutta prototyypimuottien valmistukseen. Prototyypimuottien ensisijainen käyttötarkoitus on mattojen pintaosan valmistus reaktioruiskuvalutekniikalla. Työn ensisijaisena tavoitteena on valita parhaiten soveltuva tekniikka, jolla mattojen pintaosan valmistuksessa tarvittava muotti voidaan valmistaa.

Valmis sarjatuote sisältää myös vaahtomaisen eristekerroksen, joka lisätään erillisessä vaahtotuspisteessä pintaosan alapinnalle. Koska eristekerros on oleellinen osa tuotetta, tulee se olla valmistettavissa myös prototyypituotteelle. Tästä johtuen työn toissijaisena tavoitteena on tutkia pintaosan valmistukseen valitun pikavalmistustekniikan soveltuvuutta myös eristekerroksen valmistuksessa tarvittavan muotin valmistukseen.

Uusien tuotteiden suunnittelussa ja testauksessa esiintyy tarve yksittäisten mattojen valmistukselle, mikä on nykyisellä muottitekniikalla varsin kallista.

Pikavalmistustekniikan käytön tavoitteena on alentaa prototyytuotteiden valmistuksessa syntyviä muottikustannuksia sekä parantaa muottien joustavampaa ja nopeampaa saatavuutta.

2 REAKTORUISKUVALU

Reaktioruiskuvalu eli RIM (Reaction Injection Molding) on valutekniikka, joka on kehitetty polyuretaanikappaleiden valmistamiseen. Nimensä mukaisesti kyseessä on valumenetelmä, jossa muottiin injektoidut raaka-aineet reagoivat keskenään muodostaen kappaleen. RIM-menetelmä on kehitetty pääasiassa polyuretaanituotteiden valmistukseen, mutta sitä on käytetty myös erilaisten hartsien ja polyamidien prosessoinnissa (2).

RIM-menetelmät voidaan jakaa periaatteellisesti kahteen ryhmään: matala- ja korkeapainetekniikoihin. Matalapainemenetelmissä valu voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on annostella raaka-aineseos avoimeen muottiin, joka suljetaan polyuretaanin muodostumisen ajaksi. Tätä tapaa käytetään usein vaah tomaisten kappaleiden valmistuksessa.

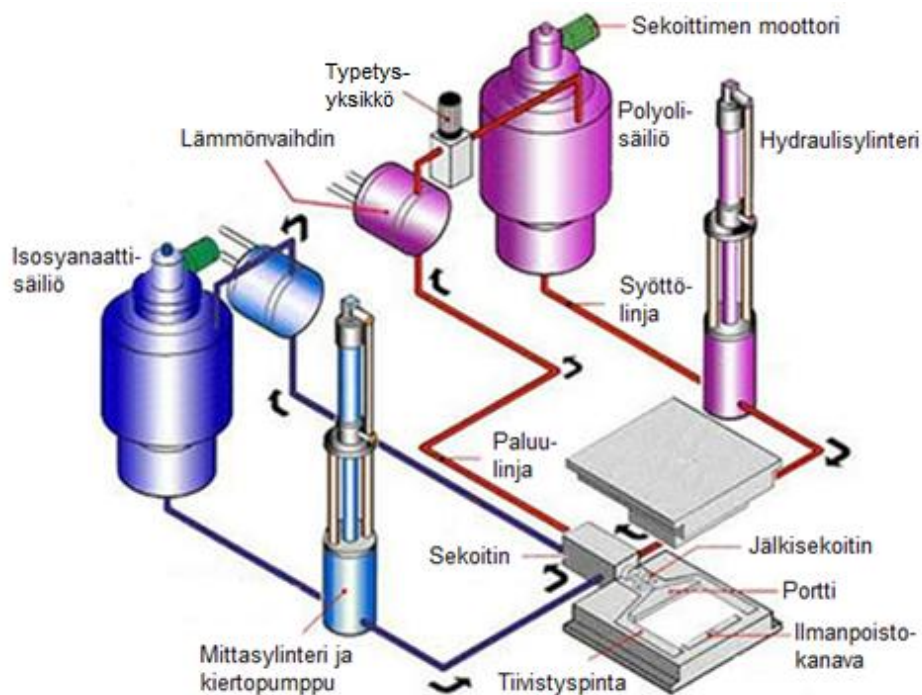
Toinen tapa on ruiskuttaa raaka-aineseos alhaisella paineella suljettuun muottiin. Alhaisen ruiskutuspaineen vuoksi muotin täytyminen on hitaampaa ja muottiin voi jäädä haitallisia ilmataskuja. Muotin täyttymistä voidaan parantaa kääntelemällä muottia ruiskutuksen aikana, jolloin ilma pääsee pakenemaan myös taskumaisista muodoista. (3, s. 64.) Muotin hitaamman täyttymisen vuoksi myös seoksen reaktioaika tulee olla pidempi kuin korkeapainetekniikassa. Hitaamman reaktionopeuden vuoksi myös tuotteen valmistusaika on pidempi.

RIM-tekniikassa yleisimmin käytetyt raaka-aineet ovat isosyanaatti ja polyoli, jotka reagoivat kemiallisesti muodostaen polyuretaanin. Isosyanaatti- ja polyolilaatuja on useita erilaisia, ja eri laaduilla kappaleelle saavutetaan erilaisia koostumuksia. Isosyanaatin ja polyolin reaktionopeuden määräävät seoksessa käytettävät raaka-aineet sekä mahdolliset aktivointiaineet. Aktivointiaineilla suurikin seosmäärä saadaan jähmettymään tarvittaessa jo muutamassa sekunnissa. RIM-menetelmästä on kehitetty myös kuitulujitteisia muunnelmia, joilla polyuretaanituotteen lujuusominaisuuksia saadaan parannettua. Tunnetuimmat kuitulujitteiset menetelmät ovat RRIM (Reinforced Reaction Injection Molding) ja SRIM eli Structural Reaction Injection Molding. (4, s. 175–

176.) RRIM-tekniikassa polyuretaania vahvistetaan seostamalla siihen jauhattuja kuituja, kun taas SRIM-tekniikassa lujitteena käytetään jatkuva- tai katkokuitumatoista valmistettuja lujite-aihoita. (4, s. 50,176.) Lujitemateriaalina käytetään yleisesti lasikuitua sen edullisuuden vuoksi, mutta myös muiden lujitekuitujen käyttö on mahdollista. Seuraavassa on esitelty reaktioruiskuvalu-tekniikan toimintaperiaate korkeapaine-RIM:n näkökulmasta, koska selvityksen tilaajalla on tarve korkeapainetekniikkaan soveltuville prototyypimuotteille.

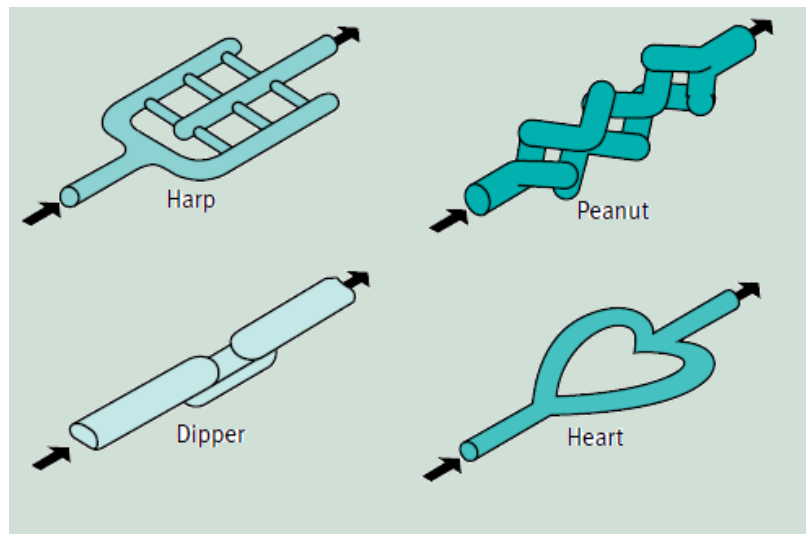
2.1 Korkeapaine-RIM

RIM eli reaktioruiskuvalu on valumenetelmä, jossa koneikolla paineistetut nestemäiset raaka-aineet syötetään linjastoa pitkin sekoittajaan ja siitä edelleen jälkisekoittajan lävitse lämpösäädelyyn muottiin. Valun onnistumisen kannalta prosessin tärkeimmät tekijät ovat paine, lämpötila ja irroitusaine (5). Kuvassa 1 on esitetty RIM-laitteiston toimintaperiaate ja pääkomponentit.



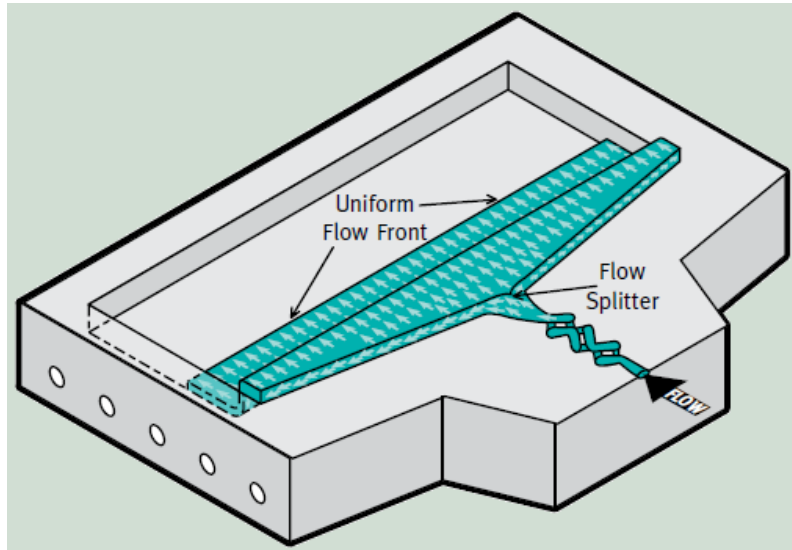
KUVA 1. RIM-laitteiston periaatekuva pääkomponentteineen (6)

Nestemäinen isosyanaatti ja polyoli ovat paineistetuissa säiliöissä, joista ne johdetaan mittasyylintereihin. Mäntätyyppinen mittasyylinteri puristaa nesteet suurella paineella sekoittimeen, jossa nestevirrat kohdistetaan toisiinsa. Suurella nopeudella toisiinsa törmäävät nesteet sekoittuvat lähes täydellisesti. Syntynyt seos johdetaan jälkisekoittajaan, jolla seoksen täydellinen sekoittuminen varmistetaan. (7, s. 103–105.) Kuvassa 2 on esimerkkejä jälkisekoittimista.



KUVA 2. Jälkisekoittimien malleja (3, s. 54)

Jälkisekoittajasta seos virtaa porttiin ja siitä edelleen muottiin. Portin tärkein tehtävä on tasoittaa suurella nopeudella etenevän seoksen virtausta. Seoksen tulee virrata muottiin laminaarisesti, jotta muotti täytyisi tasaisesti ja ilmakuplien muodostumiselta vältyttäisiin. Portin oikealla muotoilulla voidaan vaikuttaa myös muotin eri osien täyttymiseen, mikä voi olla tarpeellista epäsymmetrisiä kapaleita valmistettaessa. Kuvassa 3 on esitetty tyyppillinen porttiratkaisu.



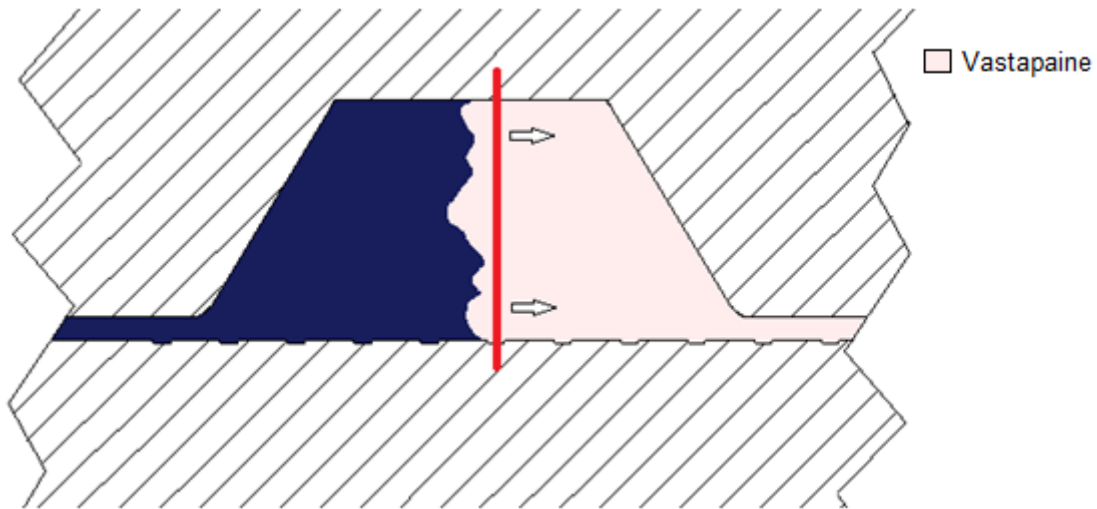
KUVA 3. Virtausta jakavan portin rakenne (3, s. 55)

Korkeapainetekniikan suurin eroavaisuus edellä mainittuun matalalla ruiskutuspaineella toimivaan tekniikkaan on muotin täyttymistapa. Matalapainetekniikassa muotin täytyminen ja ilman poistuminen perustuu muotin kääntämiseen ruiskutusvaiheen aikana. Korkeapainetekniikassa täytyminen perustuu muotin kääntämisen sijaan seoksen viskositeettiin, suureen ruiskutuspaineeseen, muotin nopeaan täyttymiseen ja muotissa olevan ilman aiheuttamaan vastapaineeseen (8).

Seoksen laminaarinen virtaus sekä tarkoin säädeltävissä oleva viskositeetti ovat avaintekijöitä muotin tasaiselle täyttymiselle. Nesteiden sekoittumisen jälkeen seoksen viskositeetti muutetaan aktivointiaineiden avulla jähmeäksi, jollaisena se virtaa muotissa laavamaisesti. Suuren ruiskutuspaineen ansiosta suurikin muotti voidaan täyttää jopa muutamassa sekunnissa.

Muotissa oleva ilma pääsee poistumaan muotista jakotasolle sijoiteltujen ilmanpoistokanavien kautta. Ilmanpoistokanavien pinta-ala määrää muotiin syntyvän vastapaineen suuruuden. Liian alhainen vastapaine voi aiheuttaa syöttökanavan yläpuolisten muotojen vajaan täyttymisen. Vastapaineen

ansiosta seos täyttää muotin tasaisesti etenevänä rintamana. Kuvalla 4 on pyritty havainnollistamaan muotin täyttymistä.



KUVA 4. Muotin täyttyminen

Ruiskutus syklien välillä raaka-aineita kierrätetään omissa järjestelmissään optimaalisen lämpötilan ylläpitämiseksi sekä nesteiden saostumisen estämiseksi. Polyuretaanin jähmettyminen pisteeseen, jolloin tuote voidaan poistaa muotista vaihtelee 30–80 sekuntiin (7, s. 102) riippuen polyuretaaniseoksen kemiallisista ominaisuuksista.

2.2 Polyuretaani

Polyuretaani on yleisnimi polymeereille, jotka syntyvät isosyanaatin reagoidessa eri yhdisteiden kanssa. Tässä reaktiossa syntyy uretaaniryhmiä $-NH-CO-O-$ sekä muita yhdisteitä sen mukaan, mitkä aineet reagoivat keskenään. Polyuretaani luetellaan kuuluvaksi kertamuovien joukkoon, koska sitä ei voida palauttaa lämmön avulla alkuperäiseen muotoonsa ja uudelleenkäyttää. Polyuretaaneja on lukuisia erilaisia niiden monipuolisen kemian vuoksi, ja tärkeimmät polyuretaanit perustuvat di-isosyanaattien ja polyolin väliseen reaktioon. Yleisimmät isosyanaatit ovat difenyyli-metaani-4,4-di-isosyanaatti (MDI) ja tolueniidi-

isosyanaatti (TDI). Polyoleina käytetään yleensä polyeetteri- tai polyesteri-polyoleja. (4, s. 50.)

Polyuretaanin erilaiset valmistusmenetelmät sekä valmistuksessa käytettävät kemikaalit mahdollistavat polyuretaanin monimuotoisuuden. Polyuretaanin tunnetuin käyttökohde on erilaiset eristeet sen erittäin hyvän lämmöneristävyyden vuoksi. Polyuretaania käytetään myös liimoina, pinnoitteina ja esimerkiksi istuimien käsinojissa. Autoteollisuudessa polyuretaanista valmistetaan mm. puslia, spoilereita sekä kuitulujitteisia puskureita. (4, s. 50–51.)

2.3 Irrotusaine

Irrotusaineen käyttö RIM-tekniikassa on lähes välttämätöntä käytettäessä suuripintaenergisiä muotteja, kuten alumiinimuotteja. Nestemäinen polyuretaaniseos on ominaisuuksiltaan verrattavissa liimaan, joka kiinnittyy erittäin tiukasti lähes mihin tahansa pintaan. Polyuretaanin kiinnittymistä muottiin estetään muotin pinnoille levitettävällä irrotusaineella. (5.)

Irrotusaineen toiminta perustuu muottipinnan suuren pintaenergian pienentämiseen. Kalvomainen pienienerginen irrotusaine muotin pinnalla estää suurenergisen polyuretaanin ja muottipinnan kiinnittymisen toisiinsa. Muottipinnan puhtaus sekä täydellinen käsittely irrotusaineella on erityisen tärkeää, sillä pienikin alueellinen kiinnittyminen voi vaurioittaa muotista irroitettavaa kappaletta tai kuluttaa muotin pintaa. (4, s. 395.)

Irrotusaineita on saatavissa vahoina, pastoina ja nestemäisinä. Nestemäiset irrotusaineet ovat suosittuja helpon käytettävyyden vuoksi. Nestemäiset irrotusaineet voidaan levittää siveltimellä tai ruiskuttaa muotin pintaan, jolloin isotkin pinnat saadaan käsiteltyä vaivattomasti ja nopeasti. Irrotusaineen valintaan vaikuttavat mm. muotin materiaali, käyttölämpötila, kappaleen geometria, kappaleen pinnalle halutut ominaisuudet ja käsittelyn suorittamiseen käytössä oleva aika. (4, s. 396.)

3 MUOTILTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET

Tässä luvussa käsitellään maton pintaosan eli nahan valmistamista korkeapainereaktioruiskutekniikalla. Koska prototyypimuottien ensisijainen käyttökohde on nahan valmistus, pikavalmistustekniikan soveltuvuus vaahtomaisen eristekerroksen valmistukseen on esitetty kokonaisuudessaan luvussa 9.

Seuraavaksi esitellään muotin valmistuksessa huomioitavia suureita ja ominaisuuksia. Sarjatuotantomuotilla tarkoitetaan alumiinista koneistettua muottia, johon prototyypimuotin ominaisuuksia verrataan.

3.1 Lujuustekniset ominaisuudet

Polyuretaaniseoksen suuresta ruiskutusaineesta, nopeasta muotin täyttymisestä ja muotissa olevan ilman vastapaineesta aiheutuva noste on noin 1 MPa. Toisin sanoen voima, joka pyrkii avaamaan muottia, on lähes 100 000 kg neliometriä kohden. Valmistettavan kappaleen muodosta riippuen, muottiin voi kohdistua myös vaakasuuntaisia voimia, jotka pyrkivät muuttamaan muotin muotoa aiheuttaen tuotteeseen mittavirhettä. Jotta tuote olisi asetettujen mitta-vaatimusten mukainen, tulee muotin olla riittävän jäykkä niin pysty- kuin vaakasuunnissakin.

3.2 Valmistustarkkuus

Suurin sallittu mittapoikkeama tuotteen pituus- ja leveysuunnassa on ± 1 mm/m. Tuotteen pintakerroksen paksuus saa vaihdella $\pm 0,5$ mm annetusta. Jotta tuotteelle asetettuja mittatoleransseja ei ylitetä, täytyy muotin valmistusmenetelmä olla riittävän tarkka.

Sarjatuotteelle yleisien piirteiden, kuten jäykisteripojen, revintäurien sekä tuotteen ylä- ja alapintojen paikoitustarkkuus kappaleen koordinaatistossa tulee olla $\pm 0,5$ mm asetetusta. Edellämainittujen asioiden lisäksi tuotteen valmistustarkkuuteen vaikuttaa muottikutistuma. Tuotteen muottikutistuma on lasken-

nallisesti 0,6 %, ja se huomioidaan muotin suunnittelussa. Sarjatuotantomuotille asetetut vaatimukset pätevät myös prototyypimuotissa.

3.3 Lämmönkestävyys

Mattojen pintakerros valmistetaan MDI-pohjaisesta seoksesta. Kyseisen seoksen optimaalinen lämpötila valmistusprosessin aikana on 50 °C. Lämpötilaa ylläpidetään raaka-aineiden lämmityksen lisäksi myös muottia lämmittämällä. Muotin lämpötilaa voidaan säädellä joko sähköisillä lämmityselementeillä tai muotissa kiertävän nesteen avulla. Sarjatuotantomuotin jatkuva käyttölämpötila on 50 °C, ja muotin lämmitystapana yleisin on nestekierto. (5.)

Prototyypimuotin pintamateriaalin lämmönkesto tulee olla vähintään 50 °C. Lisäksi prototyypimuotin lämmönjohtavuuskyky tulee olla riittävä tasaisen lämmönjakautumisen varmistamiseksi. Lämmityksen aikana muotin lämpötila voi paikoin nousta myös huomattavasti yli 50 °C:n riippuen lämmitysjärjestelmän toteutustavasta.

3.4 Kulutuskestävyys

Sarjatuotantomuotin käyttöikä on useita vuosia, ja muotin tulee kestää satoja tuhansia käyttökertoja. Muottia kuluttaa sen sisällä virtaava nestemäinen polyuretaani. Tuotteiden ääneneristyskykyä parannetaan lisäämällä nestemäiseen polyuretaaniseokseen bariumsulfaattia, joka lisää virtaavan nesteen kuluttavaa vaikutusta. Nesteen virtauksesta aiheutuva kuluminen on suurimmillaan syöttökanavan välittömässä läheisyydessä, missä virtausnopeus on suurimmillaan. Virtauksesta aiheutuvaa muotin kulumista voidaan vähentää sijoittamalla syöttökanava kohtaan, mistä polyuretaaniseos pääsee virtaamaan muottiin mahdollisimman esteettömästi.

Polyuretaani kuluttaa muottia virtauksen lisäksi myös tuotetta poistettaessa. Muottia avattaessa sekä tuotetta irrotettaessa muottiin osittain kiinnittynyt polyuretaani pyrkii irroittamaan muotin pinnasta materiaalia. Tuotteen irroituksesta aiheutuva kuluminen on hyvin vähäistä, mutta useiden tuhansien

irroituskertojen jälkeen kulumista voi olla havaittavissa. Kiinnittymistä estetään muottipinnoille levitettävällä irrotusaineella.

Prototyypimuotin kulutuskestävyydellä ei ole yhtä suurta merkitystä kuin sarjatuotantomuotilla. Prototyypimuotilla valmistettavien tuotteiden sarjasuu-ruus on suurimmillaan kymmenen tuotetta. Muotin tulee kestää avaamisesta ja kappaleen poistamisesta aiheutuva rasitus, eikä muotin pinnasta saa irrota materiaalia kappaleeseen. Jotta tuote saadaan poistettua prototyypimuotista sitä rikkomatta, tulee muotin pintamateriaalin soveltua käytettäväksi irrotus-aineen kanssa.

3.5 Pinnanlaatuvaatimukset

Lasikuulapuhallettu alumiini vastaa pinnanlaatuvaatimuksiltaan sarjatuotanto-muotilta vaadittavaa pinnanlaatua. Liian sileä pinta aiheuttaa irrotusaineen pysyvyysongelmia ja puolestaan liian karhea muottipinta peilautuu tuotteisiin. Prototyypimuotin pinnanlaadussa pyritään samaan kuin sarjatuotantomuotissa.

3.6 Valmistettavuus

Sarjatuotantomuotin valmistettavuudella on käytännössä rajoitteena valmis-tusaika. Sarjatuotantomuotin valmistukseen sallittava aika on korkeintaan 12 viikkoa. Prototyypimuotti tulee olla valmistettavissa viidessä viikossa.

3.7 Valmistuskustannukset

Keskikokoisen sarjatuotantomuotin eli alumiinista koneistettujen ylä- ja ala-muottipuolten yhteiskustannus on noin 100 000 euroa. Prototyypimuotille hyväksyttävät valmistuskustannukset ovat maksimissaan 10 % sarjatuotan-tomuotin valmistuskustannuksista.

4 TUNNETTUJA PROTOMUOTTITEKNIKOITA

Valettavien piensarjatuotteiden ja prototyypikappaleiden valmistuksessa pyritään usein mahdollisimman alhaisiin työkalukustannuksiin. Työkalukustannukset koostuvat suurimmaksi osaksi muotin ja sen valmistamiseen mahdollisesti tarvittavan mallin valmistuskustannuksista. Tämän vuoksi piensarjoja ja prototyyppejä valmistaessa on pyritty mahdollisimman edullisiin muottitekniikoihin. Edullisen muotin ansiosta myös yksittäiskappaleina valmistettujen tuotteiden kustannukset jäävät järkevälle tasolle.

Muovituotteiden valmistuksessa on perinteisesti käytetty valettuja tai laminoituja muotteja joiden valmistukseen tarvitaan tavallisesti malli. Nykyisin hyvin yleinen mallien valmistustapa on NC-koneistus. NC-koneistukseen sopivia materiaaleja ovat käytännössä lähes kaikki lastuttavat materiaalit. Tyypillisiä koneistettavia mallimateriaaleja ovat uretaani- ja epoksiseokset sekä erilaisista puristemasoista valmistetut aihiot.

Seuraavassa on esitelty prototyypimuottien valmistukseen sovellettuja muottitekniikoita. Esiteltävät tekniikat ovat valittu sillä edellytyksellä, että niitä voidaan soveltaa korkeapaine-RIM-tekniikassa.

4.1 Lujitemuovimuotit

Lujitemuoveista valmistetuissa muoteissa käytetyin lujitemateriaali on lasikuitu. Lasikuitu sopii erinomaisesti prototyypikäyttöön edullisuutensa vuoksi. Hiilikuitua käytetään muottimateriaalina pääasiassa vain hiilikuitutuotteiden valmistuksessa.

Lujitemateriaalin sidosaineena eli matriisimuovina käytetään pääsääntöisesti kertamuoveja, joista käytetyimmät ovat epoksit, tyydyttämättömät polyesterit ja vinyyliesterit. Muita vähemmän käytettyjä matriisimuoveja ovat polyuretaanit, polyimidit ja fenoliformaldehydit. (4, s. 35.)

Muotit valmistetaan tyypillisesti käsin- tai ruiskulaminoimalla. Muottien jäykistämiseen voidaan käyttää erillistä jäykisterakennetta tai muotti voidaan jäykistää esimerkiksi kevytbetoni- tai epoksivalulla. (4, s. 206–207.) Lujitemuovimuottien huonoin ominaisuus reaktioruiskuvalutekniikan kannalta on huono lämmönjohtavuus sekä suhteellisen hauras rakenne.

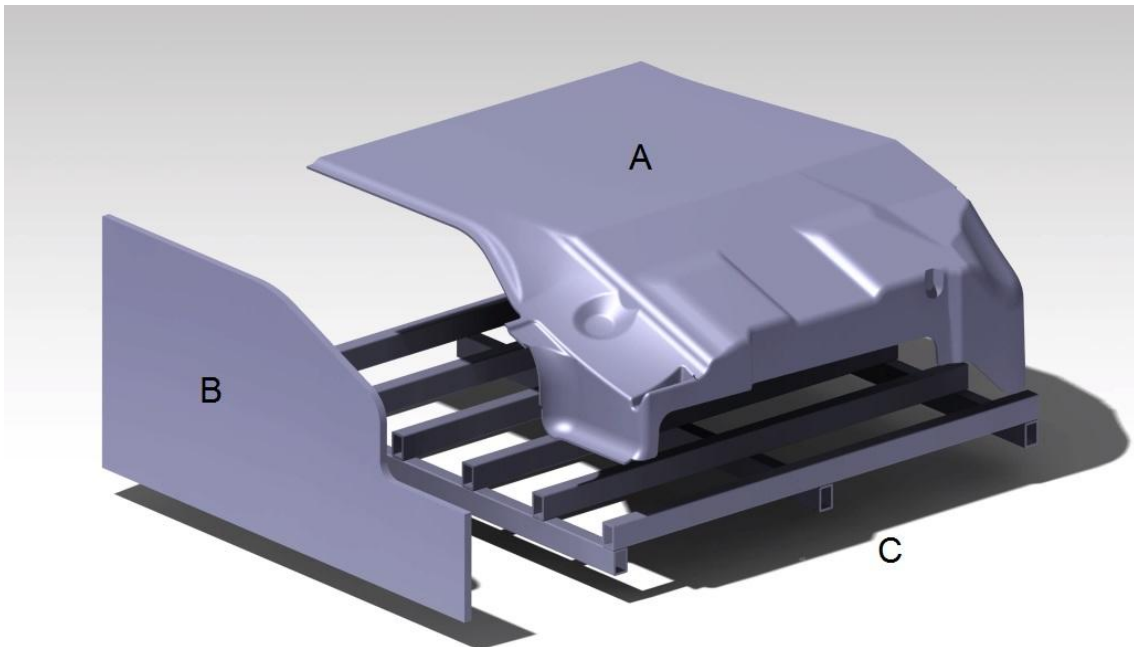
4.2 Metalloidut muottikuoret

Lujitemuoveista valmistettujen muottien heikkouksia voidaan parantaa metalloimalla muotin pinta. Metalloidut muottikuoret ovat osittain kehitetty korvaamaan kokonaan metallista valmistettuja muotteja sovelluksissa, joissa muotin pinnalta vaaditaan hyvät kulutuskestävyys- ja lujuusominaisuudet.

Metallointi voidaan suorittaa mm. ruiskuttamalla tai höyryttämällä metallia kappaleen pintaan ja elektrolyyttisellä pinnoituksella. Ruiskuttamalla metallikuoren valmistus on nopeaa ja edullista, mutta haittapuolena on pinnan huokoinen rakenne. Ruiskutettavia metalleja ovat erilaiset sinkki-tina- ja vismuttiseokset. Elektrolyyttisessä pinnoituksessa muotin pintaan muodostuu noin viiden millimetrin paksuinen metallikerros. Elektrolyyttisellä pinnoituksella muotin pintaan saadaan tasainen ja hyvin kulutusta kestävä pinta. Elektrolyyttisessä pinnoituksessa yleisin pinnoitemateriaali on nikkeli. (4, s. 201–202.)

5 PROTOTYYPPIMUOTIN RAKENNE

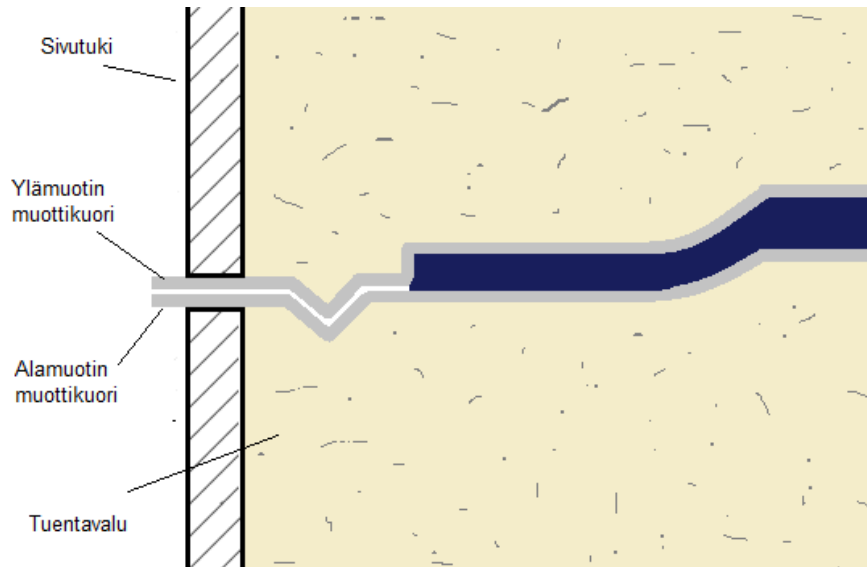
Tässä luvussa tarkennetaan pikavalmistustekniikan käyttötarkoitusta ja esitellään luonnos prototyyppimuotin rakenteesta. Pikavalmistustekniikalla on tarkoitus valmistaa kappaleen pinnan mukainen muottikuori (kuva 5), jota käytetään hyväksi prototyyppimuotin valmistuksessa. Muottikuori vastaa pinnanlaadultaan ja tarkkuudeltaan sarjatuotantomuottia, mutta sitä ei voida sellaisenaan käyttää maton valmistuksessa. Ohut ja joustava muottikuori tulee tukea asianmukaisesti erillisellä tukirakenteella. Tukirakenteena voidaan käyttää esimerkiksi putkirakenteen ja valun yhdistelmää. Tuentatavasta on esitetty luonnos kuvassa 5.



KUVA 5. Muottikuoren tuenta: a) muottikuori, b) sivutuki, c) tukikehikko

Kuvassa näkyvän tukikehikon ja muottikuoren väli voidaan tukea esimerkiksi kevytbetoni- tai epoksivalulla. Valu tukee muottikuorta tasaisesti siirtäen siihen kohdistuvan voiman tukikehikkoon, joka välittää sen edelleen muottipuristimeen. Sivutukien tehtävänä on tukea muottia sivuttaissuunnassa ja estää mahdollisten muodonmuutosten syntyminen. Muottia kiertävät sivutuet ovat tarpeelliset myös

tukimateriaalin valamisen aikana. Tämän lisäksi sivutukea voidaan käyttää apuna ylä- ja alamuotin tiivistyksessä. Mitoittamalla sivutuet siten, että ylä- ja alamuottien muottikuoret jäävät sivutukien väliin saadaan aikaan muotin tehokas tiivistyminen. Ylä- ja alamuottikuorten tiivistämistä on havainnollistettu kuvalla 6.



KUVA 6. Muotin tiivistäminen sivutukien avulla

Prototyypimuotin kiinnittämisessä muottipuristimeen on suositeltavaa käyttää välikappaletta, joka sisältää ylä- ja alamuottien kiinnittämiseen ja paikoitukseen tarvittavat mekanismit. Näin prototyypimuotin asetus saadaan nopeaksi ja prototyypikappaleen valmistuksesta aiheutuva tuotantokatkos mahdollisimman lyhyeksi.

6 PIKAVALMISTUSTEKNIIKAT

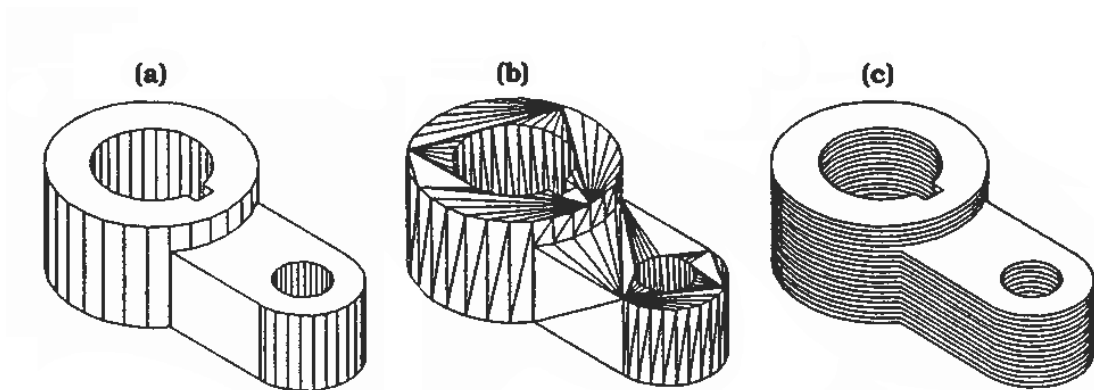
Pikavalmistus (englanniksi RP, Rapid Prototyping) on nykyisin varsin laajasti sovellettu tekniikan ala. Tarve pikavalmistusratkaisuilla valmistetuille kappaleille on kehittynyt 3D-CAD -ohjelmistojen käytön yleistymisen myötä. 3D-CAD -ohjelmalla mallinnettu kappale voidaan tulostaa fyysiseksi malliksi ilman pikavalmistusratkaisun käyttöön tarvittavaa erityisosaamista. Suunniteltavan tuotteen geometrian ja esimerkiksi valmistettavuuden arviointi helpottuu huomattavasti mittatarkkojen pikamallien avulla. RP-laitteilla voidaan valmistaa kokoonpanoja, joita voidaan käyttää hyväksi esim. mekaniikan toimivuuden tarkastelussa. Pikamallien käyttö suunnittelutyössä voi ennalta ehkäistä ongelmia, jotka on ennen havaittu vasta tuotantovaiheessa.

Toimistokäyttöön soveltuvat laitteet käyttävät materiaalina yleensä eri muovilaatuja ja valmistettavien kappaleiden koot ovat suurimmillaan noin 300 x 300 x 300 mm. Suurimmissa teollisuuskäyttöön tarkoitetuissa robottisovelluksissa ulottuvuudet ovat jopa useita metrejä. Useat pikavalmistustekniikat mahdollistavat myös lopputuotteiden valmistuksen materiaalin ollessa esimerkiksi terästä. (9, s. 240–250.)

6.1 Valmistuksessa tarvittava geometriatieto

Pikavalmistusratkaisuille on yhteistä kappaleiden valmistus STL eli Stereolitografiatiedoston pohjalta. STL-tiedosto muodostetaan 3D-solidimallista 3D-CAD -ohjelman avulla. Kääntäjä muodostaa 3D-CAD -mallista kolmioverkon, joka on monitahoinen likiarvo kappaleen muodosta. Yksinkertaistettuna STL-tiedosto sisältää listan x-,y- ja z- koordinaattikolmioista, jotka yhdistettyinä muodostavat kappaleen muotoisen kolmioverkon. STL-tiedoston luonnissa käytetty toleranssi vaikuttaa kappaleen valmistustarkkuuteen. Mitä pienempi toleranssi on, sitä pienempiä kolmioita STL-tiedosto sisältää ja kolmioista muodostettu pinta vastaa tarkemmin alkuperäistä. (10, s. 36–38.)

Viimeisenä vaiheena ennen kappaleen valmistusta suoritetaan STL-tiedoston kääntäminen pikavalmistuslaitteen käyttämään muotoon. Kääntö suoritetaan pikavalmistuslaitteen esikäsittelyohjelmalla. Tätä vaihetta kutsutaan myös viipaloinniksi (englanniksi slicing), jossa 3D-CAD -mallista muodostettu STL-tiedosto jaetaan kerroksiin. Esikäsittelyohjelma luo kullekin kerrokselle työradan, jonka perusteella pikavalmistuslaite valmistaa kappaleen kerros kerrokselta. Kuvassa 7 on havainnollistettu kappalegeometrian muodostamisen vaiheet.



KUVA 7. Kappalegeometrian muodostamisen vaiheet: a) solidimalli, b) STL-tiedosto, c) pikavalmistuslaitteen käyttämä viipaletiedosto (11)

Tyypillisiä käyttäjän määrittämiä ja valmistustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kappaleen asemointi laitteen koordinaatistoon, kerrospaksuus eli viipalointitiheys ja laitekohtaiset lisäasetukset. Asetusten määrittelyn jälkeen esikäsittelyohjelmalla generoidaan tiedosto, joka sisältää kaikki kappaleen valmistukseen tarvittavat tiedot. Esikäsittelyohjelmat ja pikavalmistuslaitteiden käyttämät lopulliset tiedostomuodot ovat laitevalmistajakohtaisia.

Erityyppisille pikavalmistustekniikoille ei ole virallista jaottelua kuten esimerkiksi lastuavan työstön menetelmille. Pikavalmistusmenetelmiä voidaan jaotella useiden periaatteiden mukaisesti, kuten materiaalin, kappaleiden koon tai vaikkapa valmistettavan kappaleen käyttötarkoituksen mukaan. Pikavalmistustekniikoista käytetään puhekielessä myös lyhenteitä, jotka ovat eri laite-

valmistajien tekniikoilleen antamia nimityksiä. Tässä selvityksessä pikavalmistusmenetelmien jako perustuu pikavalmistuslaitteen käyttämän raaka-aineen olomuotoon. Kyseinen jako sopii kaikille ainetta lisääville pikavalmistustekniikoille ja laitteille. (10, s. 57.)

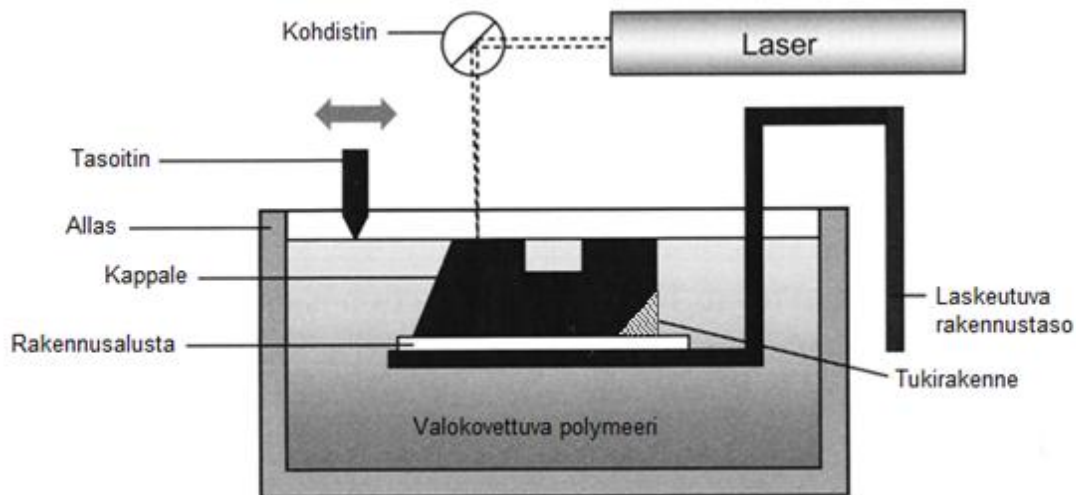
Pikavalmistustekniikat ovat jaettu tässä selvitystyössä kolmeen ryhmään: nestemäistä, kiinteää ja jauhemaista materiaalia käyttäviin menetelmiin. Eri ryhmiin kuuluvien laitteiden eroavaisuuksia on havainnollistettu seuraavaksi esiteltyjen laitteiden avulla.

6.2 Nestemäistä materiaalia käyttävät tekniikat

Nestemäistä materiaalia käyttävissä pikavalmistuslaitteissa kappale muodostetaan kerroksittain nestemäistä raaka-ainetta kovettamalla. Valmistusprosessissa kappale muodostetaan seuraavalla tavalla (10, s. 59):

1. Valokovettuva polymeeri on altaassa nestemäisessä muodossa.
2. Laskeutuvaa rakennustasoa lasketaan halutun kerrospaksuuden verran nestepinnan alapuolelle.
3. Neste kovetetaan pyyhkäisemällä UV-laserilla kerrokselle halutut piirteet, aloittaen alimmasta kerroksesta.
4. Rakennustasoa lasketaan alaspäin asetetun kerrospaksuuden verran ja nesteen pinta tasoitetaan uudelleen seuraavan kerroksen valmistusta varten.
5. Vaiheita 3 ja 4 toistetaan, kunnes kappaleen ylin kerros on kovetettu.
6. Viimeisenä vaiheena on kappaleen jälkikovettaminen, jolloin lopullinen lujuus saavutetaan.

Nestemäistä materiaalia käyttävistä pikavalmistustekniikoista yksi yleisimmistä on seuraavaksi esitelty SLA-tekniikka. Kuvassa 8 on esitetty 3D-Systemsin SLA (Stereolitography apparatus) -laitteiston pääkomponentit.



KUVA 8. SLA-laitteiston pääkomponentit (12, s. 41)

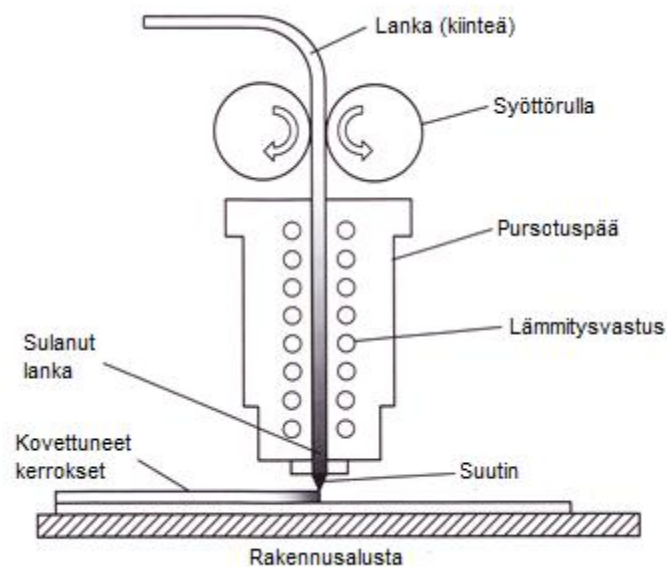
Mikäli valmistettavan kappaleen geometria sisältää ulokkeita tai kotelomaisia muotoja, tulee valmistettavaa pintaa tukea erillisellä tukirakenteella. Tukirakenteiden suunnittelu ja valmistus on hyvin pitkälti automatisoitu SLA-prosessissa, mutta tukirakenteiden poistaminen on tarkkaa ja aikaavievää käsityötä. Kappaleen lopullinen kovettuminen voi vaatia jälkikovettamista tarkoitukseen valmistetulla laitteistolla, kuten ProCure-jälkikovetusuunilla. (12, s. 35–47.)

6.3 Kiinteää materiaalia käyttävät tekniikat

Kiinteää materiaalia käyttävien pikavalmistusmenetelmien ryhmään kuuluvat kaikki laitteet, joiden käyttämä raaka-aine on kiinteässä muodossa. Oman erityisryhmänsä muodostavat jauhemaista materiaalia käyttävät laitteet. Kiinteää materiaalia käyttävissä pikavalmistuslaitteissa raaka-aine voi olla muodoltaan mm. nauhaa, laminaatteja tai pellettejä. (12, s. 20.) Kiinteää raaka-ainetta käyttävistä menetelmistä on seuraavaksi esitelty laajalti käytössä oleva Stratasysin FDM (Fused Deposition Modeling) -tekniikka.

Kappaleen valmistus aloitetaan työratojen luonnilla, joka tehdään laitteen esikäsittelyohjelmalla. Esikäsittelyohjelma luo työratojen lisäksi kappaleen valmistuksessa tarvittavat tukirakenteet. Kappaleen valmistukseen käytettävä tiedosto

siirretään pikavalmistuslaitteeseen, minkä jälkeen kappaleen valmistus voidaan aloittaa. Lankamaista raaka-ainetta syötetään pursotuspäähän jossa se lämmitetään sulaksi. Sulaa materiaalia pursotetaan suuttimesta ohuena nauhana ja pursotuspäätä ohjataan yhtäaikaaisesti xy-tasossa laitteelle syötetyn ohjausradan mukaisesti. Kerroksen valmistuttua rakennustasoa lasketaan kerrospaksuuden verran alaspäin ja uuden kerroksen valmistus aloitetaan. Edellisen kerroksen päälle pursoitettava materiaali sulattaa osittain alemman kerroksen materiaalia, jolloin kerrokset yhdistyvät toisiinsa. (12, s. 141–143.) Kuvassa 9 on esitetty pursotuspään rakenne.



KUVA 9. Pursotuspään toimintaperiaate (12, s. 143)

Tukirakenteet valmistetaan samantapaisesti kuin itse kappale. Stratasysin FDM-tekniikka tarjoaa kaksi erilaista materiaalivaihtoehtoa tukirakenteille. WaterWorksTM:n tukimateriaalit ovat nesteeseen sulavia ja BASSTM:n materiaalit ovat käsin poistettavia. Tukimateriaalin poistamisen jälkeen kappale voidaan tarvittaessa viimeistellä esimerkiksi hiomalla ja maalaamalla. (12, s. 138–145.)

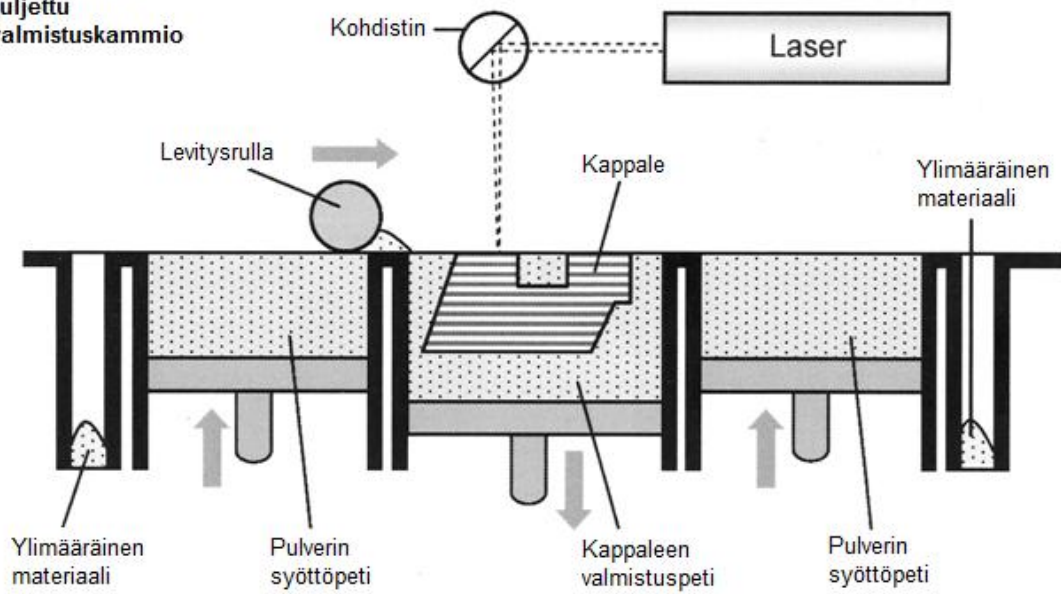
6.4 Jauhemaista materiaalia käyttävät tekniikat

Jauhemaista materiaalia käyttävät menetelmät on erotettu omaksi ryhmäksi jolla kuvataan raaka-aineen rakeisuutta. Suurin ero kahteen edelliseen ryhmään kuuluvien laitteiden kanssa on juuri raaka-aineen jauhemainen rakenne. Seuraavaksi on esitelty 3D-Systemsin SLS (Selective Laser Sintering) -tekniikan toimintaperiaate. SLS-tekniikka on yksi tunnetuimmista tähän ryhmään kuuluvista tekniikoista.

SLS-prosessissa kappale muodostetaan kerros kerrokselta sulattamalla jauhemaista materiaalia CO₂-laserin tuottaman lämmön avulla. Kuvassa 10 on esitetty SLS-laitteiston pääkomponentit. Kappaleen valmistuksessa suoritetaan seuraavat vaiheet (12, s. 200–202):

1. Sulatettavaa jauhetta levitetään ohut kerros rakennustason päälle.
2. Kappaleen alimman poikkileikkauksen mukaiset piirteet valmistetaan ensimmäiseksi. Pistemäinen laser-säde lämmittää jauheen nopeasti sulamispisteeseen ja laser-säteen siirtyessä sulat jauhepartikkelit yhdistyvät toisiinsa muodostaen kappaletta.
3. Kun kerros on sintrattu valmiiksi, rakennustasoa lasketaan alaspäin ja uusi jauhekerros levitetään edellisen kerroksen päälle.
4. Jauhe sulatetaan laserilla edelliseen kerrokseen toistaen vaiheita 2 ja 3, kunnes kaikki kerrokset on valmistettu.

Lämmitetty ja suljettu valmistuskammio



KUVA 10. SLS-laitteiston pääkomponentit (12, s. 202)

Kappaleelle ei tarvitse suunnitella erillisiä tukirakenteita, koska ylimääräinen sulamaton jauhe tukee kappaletta valmistuksen aikana. Valmis kappale poistetaan valmistuskammioista ja puhdistetaan irtojauheesta.

7 LAITTEIDEN KARSINTA

Ennen varsinaista valintavaihetta pikavalmistuslaitteille on suoritettu alustava karsinta, jolla rajataan valintavaiheessa käsiteltävien laitteiden määrää. Karsinta perustuu laitteella valmistettavan kappaleen kokoon sekä laitteen käyttämään valmistusmateriaaliin. Pikavalmistuslaitteella valmistettavan kappaleen vähimmäiskoko tulee olla 500 x 500 x 500 mm. Myös ne laitteet, joiden käyttämää valmistusmateriaalia ei voida luokitella kuuluvaksi metalli- tai muovilaatuihin, on jätetty huomioimatta. Kyseisiä valmistusmateriaaleja ovat mm. paperi, kipsi, vaha, silikoni ja kaavaushiekka.

Edellä mainittujen ehtojen lisäksi tässä selvityksessä on huomioitu ainoastaan Euroopan ja Yhdysvaltain alueella toimivien laitevalmistajien laitteet. Syyinä mm. itä-aasialaisten laitteiden pois jättämiseen on laitteiden erittäin vähäinen käyttö Euroopassa, mikä aiheuttaa ongelmia vertailussa tarvittavien tietojen saatavuudessa. Alustavan karsinnan läpäisseet pikavalmistuslaitteet on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Karsinnan läpäisseet pikavalmistuslaitteet

Nestemmäistä materiaalia käyttävät tekniikat			
Laitevalmistaja	Laitemalli	Kappalekoko	Materiaali
3D Systems	iPro 8000	650x750x550	muovi
	iPro 9000	650x750x550	muovi
	iPro 9000 XL	650x750x550	muovi
	SLA 5000	508x508x584	muovi
	SLA 7000	508x508x600	muovi
	Viper Pro SLA	737x635x533	muovi
Materialise	Mammoth	2100x700x800	muovi
Kiinteää materiaalia käyttävät tekniikat			
Laitevalmistaja	Laitemalli	Kappalekoko	Materiaali
POM	DMD505D	863x863x609	metalli
	DMD 44R	1950x2410x330°	metalli
	DMD 66R	3200x3665x360°	metalli
	DMD IC106	800x6 akselia	metalli
Stratasys	Fortus 900mc	915x610x915	muovi
	Maxum	600 x 500 x 600	muovi
Jauhemaista materiaalia käyttävät tekniikat			
Laitevalmistaja	Laitemalli	Kappalekoko	Materiaali
3D Systems	Sinterstation Pro 230	550x550x750	muovi
	Sinterstation Pro 230 SH	550x550x750	muovi
Optomec	LENS 850-R	900x1500x900	metalli
Irepa Laser	VH LF4000	650x700x500	metalli
	VI LF4000	950x900x500	metalli

8 VALINTAKRITEERIT

Tässä luvussa käsitellään pikavalmistustekniikan valinnassa käytetyt valintakriteerit ja niille annettavien arvosanojen pisteytysperusteet. Koska kyseessä on alustava selvitys eri tekniikoiden soveltuvuudesta muottien valmistukseen, valintakriteereiksi on huomioitu vain kriittisimmät tekijät, jotka ovat pinnanlaatu, kappalekoko ja valmistuskustannukset. Yksityiskohtaisempien tietojen, kuten eri materiaalivaihtoehtojen ja niiden ominaisuuksien, sisällyttäminen tähän selvitystyöhön kasvattaisi työmäärän kohtuuttoman suureksi. Valintakriteereille annettavat arvosanat on jaettu asteikolla viidestä yhteen, arvosanan viisi ollessa paras.

8.1 Pinnanlaatu

Pikavalmistuslaitteella valmistetun kappaleen pinnanlaatua verrataan alumiinista koneistetun ja lasikuulapuhalletun sarjatuotantomuotin pinnanlaatuun. Arvosanan viisi saa pikavalmistuslaite, jonka käyttämä valmistusmateriaali on metallia ja jolla valmistettu kappale vastaa pinnanlaadultaan sarjatuotantomuotia. Pikavalmistuslaitteella saavutettavaa pinnanlaatua on vaikea arvioida tarkasti pelkkien teknisten tietojen perusteella. Käytetyn kerrospaksuuden ja materiaaliominaisuuksien lisäksi pinnanlaatuun vaikuttavat oleellisesti myös kappaleen geometria sekä STL-tiedoston käsittelyssä mahdollisesti syntyvät virheet.

Tässä selvityksessä eri laitteiden pinnanlaatua on arvioitu laitevalmistajien ilmoittamien tietojen perusteella. Tarkempaa pinnanlaadun arviointia varten tulisi jokaisella arvioitavalla laitteella valmistaa mallikappale, joka sisältäisi muottipinnalle tyypillisiä muotoja. Tätä ei ole kuitenkaan mahdollista suorittaa opinnäytetyöhön varattujen resurssien puolesta. Arvosanojen sanalliset selitykset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Pinnanlaadun pisteytys

Arvosana	5	4	3	2	1
Selitys	Materiaali metallia, pinnanlaadultaan sarjatuotantomuottia vastaava	Materiaali metallia, pinnanlaatu kohtalainen	Pinnanlaatu hyvä, vaatii metalloinnin	Pinnanlaatu kohtalainen, vaatii metalloinnin	Pinnanalaatu heikko, vaatii metalloinnin tai muita jälkikäsittelyitä

Vaatus muottikuoren metalliselle pinnalle perustuu nykyisen prosessin asettamiin vaatimuksiin. Näitä ovat mm. irrotusaineen soveltuvuus prototyyppi-muotille sekä polyuretaanin mahdollisimman samankaltainen käyttäytyminen prototyyppimuotissa kuin itse sarjatuotantomuotissa.

8.2 Kappalekoko

Valintakriteerinä kappalekoko yksi merkittävimmistä tekijöistä. Arvosanan 4 saa pikavalmistusraite, jolla voidaan valmistaa kooltaan keskikokoista sarjatuotetta vastaava muottikuori. Keskikokoisen polyuretaanimaton äärimittat ovat noin 1200 x 600 x 300 mm. Arvosanojen jakautuminen nähdään taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Kappalekokojen pisteytys

Arvosana	5	4	3	2	1
Kappalekoko, mm	2000 x 900 x 500	1200 x 800 x 500	800 x 600 x 500	700 x 600 x 500	500 x 500 x 500

Kaksi ensimmäistä mitta merkitsevät pikavalmistusraiteella valmistetun kappaleen suurinta leveys- ja pituusmittaa ja viimeinen kappaleen suurinta korkeutta.

8.3 Muottikuoren valmistuskustannukset

Muottikuoren valmistuskustannuksia on selvitetty mallikappaleen pohjalta tehtyjen alustavien tarjouspyyntöjen avulla. Pikavalmistusraiteita tarjoavista yrityksistä on pyydetty kustannusarviot alustavan karsinnan läpäisseille pikavalmistusraiteille. Niiden laitteiden osalta, joilta hintatiedot puuttuvat, on valmistuskustannuksia arvioitu muiden samaa valmistustekniikkaa käyttävien laitteiden

pohjalta. Pisteiden jakautuminen valmistuskustannuksien perusteella on nähtävissä taulukosta 4.

TAULUKKO 4. Valmistuskustannuksien pisteytys

Arvosana	5	4	3	2	1
Kustannus	< 1000 €	1000-1999 €	2000-2999 €	3000-3999 €	> 4000 €

9 TEKNIIKAN VALINTA

Tässä luvussa esitellään viisi prototyyppimuottien valmistukseen parhaiten soveltuvaa pikavalmistuslaitetta. Eri pikavalmistuslaitteita pisteytettäessä on menetelty valintakriteereiden määrittelyissä mainittujen periaatteiden mukaisesti. Taulukossa 5 on esitetty viisi eniten pisteitä saanutta pikavalmistuslaitetta.

TAULUKKO 5. Viisi parhaiten soveltuvaa laitetta

Valmistaja	Malli	Ryhmä	Kappalekoko	Hinta	Pinnanlaatu	Keskiarvo
Materialise	Mammoth	Neste	4	3,5	3	3,50
3D Systems	iPro	Neste	2	4	3	3,00
3D Systems	Viper Pro SLA	Neste	2	3	3	2,67
Stratasys	Fortus 900mc	Kiinteä	2	2,5	3	2,50
3D System	Sinterstation Pro	Jauhe	1	2,5	2	1,83

Kolmea eniten pisteitä saanutta laitetta yhdistää laitteiden käyttämän materiaalin olomuoto. Tämän perusteella voidaan todeta, että nestemäistä materiaalia käyttävät laitteet ovat selvästi edullisempia kuin kiinteä- ja jauhemaista materiaalia käyttävät laitteet. Pinnanlaadun osalta nestemäistä- ja kiinteää materiaalia käyttävät laitteet ovat muottikuoren valmistuksessa jauhemaista materiaalia käyttäviä laitteita parempia. Yhteenvetona voidaan todeta, että jauhemaista materiaalia käyttävät laitteet soveltuvat hyvin huonosti muottikuoren valmistukseen suurten valmistuskustannusten, pienen kappalekoon ja huokoisen rakenteen vuoksi.

Muottikuoren valmistamista Mammoth-pikavalmistuslaitteella puoltaa pinnanlaadun ja edullisten valmistuskustannuksien lisäksi laitteella valmistettavan kappaleen suuri koko. Kyseisellä laitteella voidaan valmistaa yhdellä kertaa jopa 2100 x 700 x 800 mm:n kokoinen muottikuori. Suuren kappalekoon ansiosta käsin tehtävältä muottikuoren kokoamiselta useimpien prototyyppimuottien osalta vältytään. Yhdestä kappaleesta valmistetun muottikuoren tarkkuudessa päästäänkin lähes sarjatuotantomuotin tasolle.

10 PIKAVALMISTUSTEKNIIKOIDEN SOVELTUVUUS VAAHDOTUSMUOTIN VALMISTUKSEEN

Prototyypituotteen eristekerroksen valmistuksessa tarvittavan muotin rakenne ja toteutustapa ovat lähes samat kuin pintaosan muotilla. Merkittävimmät erot pinta- ja vaahto-osan valmistukseen käytetyissä muoteissa ovat lujuus- ja pinnanlaatuvaatimuksissa.

Vaahdon huokoisen rakenteen vuoksi vaahtotusmuotilta vaadittava pinnanlaatu on huomattavasti alhaisempi kuin maton pintaosan muotilla. Muotin pääasiallinen tarkoitus on antaa vaahtolle ajoneuvon runkoa vastaavat muodot. Koska vaahto on joustavaa ja kokoonpainuvaa, ei muotilta vaadita erityistä valmistustarkkuutta. Polyuretaanivaahdon kiinnittyminen muottiin estetään muotin pinnalle levitettävän pu-kalvon avulla. Kalvon tarkoitus on myös estää kosteuden imeytyminen vaahdon sisään.

Eristekerroksen valmistuksessa muottiin kohdistuu pääasiassa vain kaksi muotia rasittavaa suuretta, jotka ovat vaahtoutumisreaktiossa syntyvän kaasun paine sekä reaktiossa syntyvä lämpö. Reaktiossa syntyvän paineen ja lämmön suuruutta on selvitetty laboratoriomittausten avulla. Kuvassa 11 on esitetty mitauksessa käytetty välineistö.



KUVA 11. Mittausvälineistö

Paineen mittaus suoritettiin teräsputkeen asetetun nesterakon puristuspainetta mittaamalla. Laajetessaan PUR-vaahdo puristaa vedellä täytettyä kumirakkoa ja puristusaine on luettavissa rakkoon liitetystä painemittarista. Mittausten perusteella muotin sisälle muodostuvan paineen suuruus on noin 0,1 MPa. Vaahdotusmuottia avaavan nosteen suuruus on noin kymmenesosa pintaosan muottiin verrattuna. Mittauksissa käytetty polyolin ja isosyanaatin sekoitussuhde oli 10 : 6. Mittauksissa käytetyn astian nettotilavuus oli 2,6 litraa ja täysi täytös saatiin kaatamalla astiaan 190 grammaa valmista seosta.

Vaahdotusreaktion aikana seoksen lämpötila nousi astian pohjalla sijaitsevassa mittauspisteessä noin 34 asteeseen, ympäristön lämpötilan ollessa 13 astetta. Vaahdon keskiosassa lämpötilan arvioidaan olevan 10–20 astetta suurempi kuin vaahdon ulkoreunoilla. Lämpötilaeroa arvioitiin käsin koskettamalla.

Yhteenvetona voidaan todeta mattojen pintaosan valmistukseen tarkoitetun prototyyppimuotin kestävän myös vaahdotusmuottina. Alhaisemman nosteen ansiosta vaahdotusmuotin rakenne voidaan tehdä pintamuottia kevyemmäksi, mikä alentaa materiaalikustannuksia sekä helpottaa muotin käsiteltävyyttä.

11 PROTOTYYPPIMUOTIN KUSTANNUSARVIO

Prototyyppimuotin ensisijaiseen käyttötarkoitukseen eli ääneneristysmaton pintaosan valmistukseen parhaiten soveltuvaksi pikavalmistustekniikaksi valikoitui yli sadan pikavalmistuslaitteen joukosta Materialisen kehittämä Mammoth SLA -pikavalmistuslaite. Alustavien tarjousten perusteella Mammothilla valmistettujen ylä- ja alamuottikuorten yhteiskustannukset ovat noin 5 000–6 000 euroa. Muottikuorten lisäksi tukirakenteista sekä muista muottien valmistukseen tarvittavista materiaaleista aiheutuvat kulut ovat noin 2 000 euroa. Mikäli Mammothin käyttämälle valmistusmateriaalille ei ole saatavilla RIM-prosessiin soveltuvaa irroitusainetta, lisäkuluja voi muodostua muottikuorten pinnoituksesta.

Alustavien laskelmien perusteella maton pintaosan valmistamiseen käytettävän prototyyppimuotin valmistuskustannukset materiaalien osalta ovat noin 8 000 euroa. Voidaankin todeta, että erityisesti nestemäistä materiaalia käyttävät tekniikat soveltuvat hyvin prototyyppimuottien valmistukseen.

Nestemäistä materiaalia käyttävät pikavalmistustekniikat soveltuvat myös vaahdotusmuotin valmistukseen. Vaahdotusmuotin valmistuskustannukset muodostuvat pääasiassa muottikuorten valmistuskustannuksista. Muotin rakenteen mukaan kokonaiskustannuksien arvioidaan olevan noin 50–70 % pintaosan prototyyppimuotista.

12 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön ensisijaisena tavoitteena oli selvittää eri pikavalmistustekniikoista parhaiten soveltuva valmistustekniikka prototyyppimuottien valmistusmenetelmäksi. Tähän käyttötarkoitukseen parhaimmaksi tekniikaksi valikoitui Materialisen Mammoth SLA-tekniikka. Mammothilla valmistetun muottikuoren sekä muotin valmistukseen tarvittavien muiden materiaalien kokonaiskustannusten arvioidaan olevan noin 8 000 euroa, joka on 8 % sarjatuotantomuotin valmistuskustannuksista. Käytettäessä pikavalmistustekniikkaa prototyyppimuottien valmistuksessa myös markkinoinnin ja tuotekehityksen tarpeisiin valmistettujen, yksittäisten tuotteiden kustannuksissa päästään järkevälle tasolle.

On myös todennäköistä, että sopivaa irrotusainetta ja muottikuoren tuentatapaa käyttämällä prototyyppimuotilla voitaisiin valmistaa myös piensarjoja. Alumiinin hyvän kierrätysasteen ansiosta olisikin varteenotettava vaihtoehto valmistaa esimerkiksi varaosatoimitukset pääomakustannuksiltaan huomattavasti edullisimmilla prototyyppimuoteilla.

Selvityksen toissijainen tavoite oli tutkia pikavalmistustekniikoiden soveltuvuutta myös tuotteisiin lisättävän lämmöneristyskerroksen valmistukseen. Laboratorio-
mittausten perusteella todettiin vaahdotuspisteessä käytettävän muotin mekaanisten rasitusten jäävän hyvin pieniksi. Muottiin kohdistuvan alhaisen rasituksen ja irrotusaineen tarpeettomuuden ansiosta pikavalmistustekniikalla valmistetulla muotilla voitaisiin korvata nykyiset alumiinista koneistetut vaahdotusmuotit.

Seuraavana työvaiheena ennen prototyyppimuottien valmistusta tulisi selvittää Mammothin käyttämät mallimateriaalit sekä niille soveltuvat irrotusaineet. Piensarjatuotantoa varten myös muottikuoren metalloitavuus tulisi selvittää tarkemmin. Eniten aikaa vievä osa on muottikuorten valmistukseen tarvittavien 3D-mallien luominen tuotekuvien pohjalta, ellei valmiita muottikuvia ole käytävissä.

Tarjouspyyntöjen perusteella saadut tarkat hintatiedot on koottu yhteystietoineen liitteeseen 1. Tätä osaa ei esitetä selvityksen julkisessa versiossa tarjousten luottamuksellisen sisällön takia.

LÄHTEET

1. Hydnum Oy.Tuotteet. Saatavissa: <http://www.hydnum.com/index.html>.
Hakupäivä 23.10.2011.
2. Muovimuotoilu. 2011. Menetelmät, Uretaanimenetelmät. Saatavissa:
<http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/49/82/>. Hakupäivä 15.11.2011.
3. Bayer MaterialScience LLC. 2008. Engineering Polyurethanes - RIM Part and Mold Design Guide. Saatavissa:
http://www.exothermic.com/downloads/RIM%20Part%20&%20Mold%20Design%20Book-US_2009_SE.pdf. Hakupäivä 23.1.2012.
4. Airasmaa, likka – Kokko, Juha – Komppa, Veikko – Saarela, Olli – Skrifvars, Mikael 2007. Komposiittirakenteet. Helsinki: Hakapaino Oy.
5. Lassila, Antti 2011. Tuotantoinsinööri, Hydnum Oy. Tutustumiskäynti 12.12.2011.
6. Purmold. 2012. Polyurethanes, Technology. Saatavissa:
<http://www.purmold.com/purphp/technology.php>. Hakupäivä 22.1.2012.
7. Woods, George1990. The ICI Polyurethanes Book, Second edition. Hollanti: Steens Schiedam b.v.
8. Andelin, Juho 2012. Laatu- ja kehityspäällikkö, Hydnum Oy.
Opinnäytetyöpalaveri 12.2.2012.
9. Wohlers, Terry T 2011. Wohlers Report 2011. Yhdysvallat: Wohlers Associates Inc.
10. Noorani, Rafiq 2006. Rapid Prototyping: Principles and Applications. USA, New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons. Inc.

11. University of Texas, types of rapid prototyping systems. 2000. Saatavissa: http://www.me.utexas.edu/~rbarr/rapid/Types_Of_RPS.html. Hakupäivä 21.3.2012.
12. Chua - Leong - Lim 2010. Rapid Prototyping: Principles and Applications, 3rd Edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.