

## Ruiskuvalumuotin jäähditys

School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria  
Käännös: Tuula Höök - Tampereen Teknillinen Yliopisto

Ruiskuvalun perusvaiheet ovat muotin täyttö, jäähditys ja kappaleen ulostyöntö. Jäähditys on vaiheista merkityksellisin, koska siinä määrittyy vauhti, jolla kappaleita pystytään tuottamaan. Hetkellä, jolloin juokseva polymeeri ruiskutetaan pesiin, muotin lämpötilan pitäisi olla sama kuin ruiskutettavan polymeerin lämpötila. Hetkellä, jolloin kappale työnnetään muotista ulos, muotin lämpötilan pitäisi olla sama kuin koneen ympäristön lämpötila. Tällä tavoin polymeeri ruiskutettaisiin pienimmällä mahdollisella paineella ja lämpötilaero valmistuneen kappaleen ulko- ja sisäosien välillä pysyisi mahdollisimman pienenä. Kappale jäähtyy hitaasti ja valutapahtuman aiheuttamat rasitukset pysyvät pieninä.

Ruiskuvalutapahtumaa ei kuitenkaan säädetä pelkästään teknisesti edullisimmalla tavalla ja tekniset näkökohdat huomioiden. Jotta valu olisi taloudellisesti kannattavaa, kappaleet täytyy valaa niin lyhyellä jaksonajalla kuin mahdollista. Taloudellisuuden kannalta jäähdityskanaviston tärkein tehtävä on poistaa lämpö muottipesistä tehokkaasti. Tavallisesti jäähtymiseen kuluva aika on noin puolet kokonaisjaksonajasta.

Ruiskutettu polymeeri menettää lämpöä johtumalla, kun se on kosketuksissa muottipesän pintakerroksen kanssa. Lämmön johtumisen tehostamiseksi muottiin suunnitellaan muottipesän muotoja seuraavia kanavia. Kanavia kutsutaan vesirei'iksi, jäähdityskanaviksi tai temperointikanaviksi. Niistä muodostuu muotin jäähditysjärjestelmä.

Vesi on yleisin ja myös tehokkain jäähditykseen käytettävistä aineista. Veden lämmönsiirtokerroin on  $900 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , ilman  $50 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  ja öljyn  $400 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

Jäähdityksen suunnittelussa on muutama perussääntö:

- i) Kanavien tulisi olla symmetrisiä ja toisistaan erillään suhteessa kappaleen suunniteltuihin täyttöalueisiin tai esimerkiksi syvennyksiin;
- ii) Kappaleessa olevien syvennysten kohdalla oleviin seinämiin ei saisi muodostua lämpötilaeroja. Kanavien etäisyys kappaleen seinämistä tulisi huomioida;
- iii) Jäähdityksineen syöttö ja poisto tulisi suunnitella operaattorin puolelta katsottuna muotin taakse;
- iv) Veden tai muun jäähdityksineen tulisi virrata kanavien sisällä turbulentlysti. Turbulenttisuuden aste määritetään Reynoldsin luvulla:

$$R_e = \frac{v \times d \times \rho}{\mu_m}, \text{ jossa:}$$

$v$  – Virtausnopeus

$d$  – Kanavan halkaisija

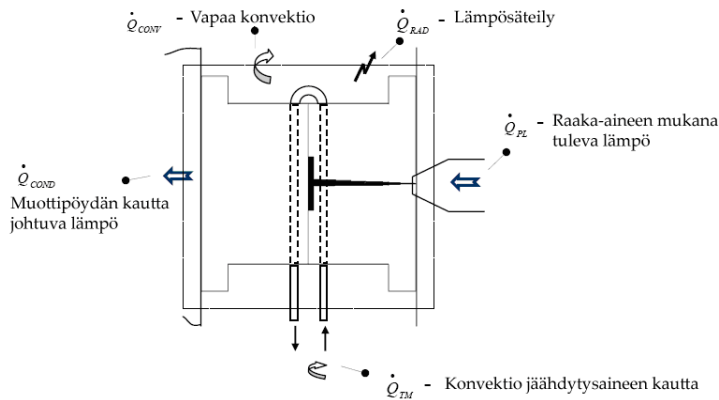
$\rho$  – Virtaavan aineen tiheys

$\mu_m$  – Virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti

### Johdanto

Polymeeriin tuotetaan lämpöä ruiskuvalukoneen ruuvissa, jotta polymeeri saadaan juoksevaan muotoon. Lämpö siirtyy muottiteräkseen sekä edelleen jäähdytyskanaviin ja muotin ulkopinnalle kappaleen jäähdytyessä. Lämmön siirtymistä tapahtuu muotista ruiskuvalukoneen pöytiin, konvektiivisesti jäähdytyskanaviston kautta jäähdytyslaitteelle sekä säteilemällä ja luonnollisen konvektion kautta muottitilan ilmaan. (Kuva 1) [1, 2].

## Lämmön siirtyminen



Kuva 1 – Lämmön siirtyminen ruiskuvalumuotissa

## Muotin lämpötasapaino

Jokaisen ruiskuvalujakson aikana valettavassa kappaleessa tapahtuu entalpiamuutoksia. Muutokset aiheuttavat lämpövirran muottimateriaaliin ja edelleen muotin ulkopuolelle. Prosessin kuvaamiseksi laaditaan yhtälö, jossa lasketaan yhteen muoviraaka-aineen mukanaan tuoma lämpöteho, muottimateriaalin kautta ympäristöön ja jäähdytysnesteeseen siirtynyt lämpöteho. Summa on yhtä suuri muottiin kertyneen lämpötehon kanssa. Muotin seinämien ja jäähdytyskanaviston kautta tulisi siirtyä ulos yhtä paljon lämpöä kuin siihen virtaa polymeerin mukana sisään. Muuten muotti ei pysy lämpötasapainossa. Jos sisään virtaava lämpöteho on suurempi kuin ulos virtaava lämpöteho, muotin lämpömäärä kasvaa. Jos sisään virtaava lämpöteho on pienempi kuin ulos virtaava lämpöteho, lämpömäärä pienenee. [1, 3]:

$$\dot{Q}_{PL} + \dot{Q}_{AMB} + \dot{Q}_{TM} = \dot{Q}_{ACCUM}$$

$\dot{Q}_{PL}$  – Polymeerin mukanaan tuoma lämpöteho

$\dot{Q}_{AMB}$  – Ympäristöön siirtynyt lämpöteho

$\dot{Q}_{TM}$  – Jäähdytysaineeseen siirtynyt lämpöteho

$\dot{Q}_{ACCUM}$  – Muottiin kertynyt lämpöteho, tasapainotilassa 0

## Yksinkertaistukset

- i) Prosessi on oletettu näennäisstaattiseksi
- ii) Valujakson aikainen lämpötilojen ja lämpövirtojen vaihtelu jätetään huomiotta
- iii) Jaksojen lämpötiloista huomioidaan keskiarvot

$$\dot{Q}_{PL} + \dot{Q}_{AMB} + \dot{Q}_{TM} = 0$$

jossa,

$$\dot{Q}_{PL} = \frac{\Delta h \times m_{PL}}{t_{arref}} \quad \text{tai,} \quad \dot{Q}_{PL} = \frac{\Delta h \times \rho_{PL} \times V}{t_{arref}}$$

joissa,  $\Delta h = h_i - h_e$ ;  $h_i$  = polymeerin entalpia ruiskutuslämpötilassa;  $h_e$  = polymeerin entalpia ulostyöntölämpötilassa;  $m_{PL}$  = muottiin ruiskutetun polymeerin massa;  $\rho_{PL}$  = polymeerin keskimääräinen tiheys ruiskutuslämpötilan ja ulostyöntölämpötilan välillä;  $t_{arref}$  = kappaleen jäähtymisaika muotissa;  $V$  = kappaleen tilavuus

$$\dot{Q}_{AMB} = \dot{Q}_{CONV} + \dot{Q}_{COND} + \dot{Q}_{RAD}, \text{ jossa:}$$

$\dot{Q}_{CONV}$  = Konvektiivisesti muotin sivuseinämien kautta siirtynyt lämpöteho

$\dot{Q}_{COND}$  = Johtumalla kappaleen seinämien kautta siirtynyt lämpöteho

$\dot{Q}_{RAD}$  = Säteilemällä muotin sivuseinämien kautta siirtynyt lämpöteho

$$\dot{Q}_{CONV} = A_L \times h \times (T_{amb} - T_{mould}), \text{ jossa:}$$

$A_L$  = muotin avoin pinta;  $h$  = lämmönsiirtymiskerroin, vapaa konvektio ilmaan;  $T_{amb}$  = ympäristön lämpötila;  $T_{mould}$  = muotin lämpötila.

$$\dot{Q}_{COND} = A_{fix} \times \beta \times (T_{amb} - T_{mould}), \text{ jossa:}$$

$A_{fix}$  = Muotin ja kiinnityksen välinen kontaktipinta;  $\beta$  = suhdeluku

$$\dot{Q}_{RAD} = A_L \times \varepsilon \times \sigma_{rad} \times \left( \left( \frac{T_{amb}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{molde}}{100} \right)^4 \right), \text{ jossa:}$$

$\sigma_{rad}$  = Stefan-Boltzman vakio;  $\varepsilon$  = materiaalin emissiiviteetti

Kun polymeeri on muotin sisällä tuomassa lämpöä,  $Q_{PL}$  on aina positiivinen. Ympäristön kanssa vaihtuva lämpöteho voi olla joko negatiivinen tai positiivinen riippuen lämpötilaeroista muotin ja ympäristön välillä.

Jos jäähditysjärjestelmä on tehokas ja jäähtymisolosuhteet optimaaliset, muotin lämpötilat pysyvät tasaisina, kappaleet tasalaatuisina ja valujakson aika sopivan pituisena. Tehokkaan ja toimivan jäähdityksen suunnittelu ei ole yksinkertaista, koska lopputulokseen vaikuttaa joukko eri tekijöitä siten, että kokonaisuutta on vaikea ennakoida. Tekijöitä ovat: kappaleen muoto, muotin lämpötila, jäähdityskanaviston rakenne, jäähdityksaineen lämpötila ja virtausnopeus.

## Jäähtymisolosuhteet

Muotin jäähditykselle voidaan määrittää kaksi määrävää tekijää [3]:

- i) Lämmön siirtymisnopeuden kasvu
- ii) Muottipesän seinämän tasainen lämpötilajakauma

Lämmön siirtymisnopeuden kasvattaminen muottimateriaalin ja valettavan kappaleen välillä on tärkeä taloudellista näkökulmaa ajatellen. Tasainen lämpötilajakauma on tärkeä kappaleiden laadun kannalta.

Jäähtymisaikaa voi arvioida Wubkenin yhtälöllä [3]

$$t_k = \frac{s^2}{\alpha\pi^2} \times \ln \left[ \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \times \left( \frac{T_w - T_a}{T_w - T_b} \right) \right], \text{ jossa}$$

$\alpha$  on materiaalin lämpötilan tasoittumiskerroin;  $s$  on kappaleen paksuus;  $T_a$  on ruiskutuslämpötila;  $T_b$  on ulostyöntölämpötila ja  $T_w$  on muotin keskimääräinen lämpötila.

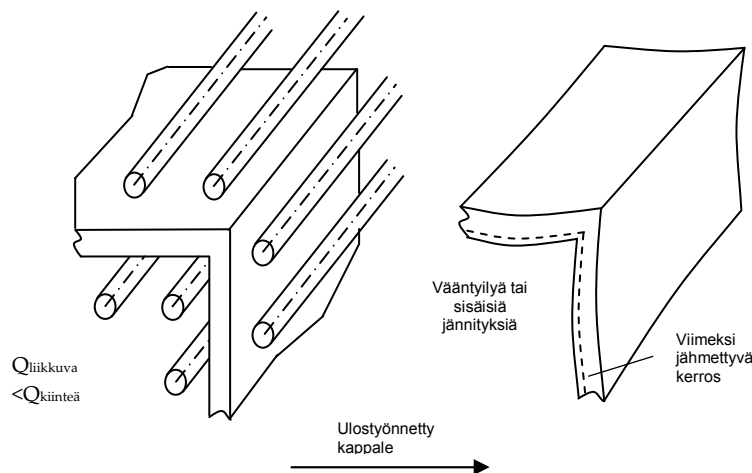
Muotin keskimääräinen lämpötila on tärkein parametri, kun määritetään jäähtymiseen kuluva aikaa [4, 5]. Joissakin kaavoissa otetaan parametriksi jäähdityksaineen lämpötila ja määritetään muotin keskimääräinen lämpötila sen perusteella. Tällöin ei kuitenkaan tule huomioida sitä, että muotin eri osien lämpötiloihin vaikuttaa muottiin ruiskutetun polymeerin lämpötila ja valuparametrit. Muotin lämpötila nousee valujakson aikana, kun polymeeri ruiskutetaan muottiin ja laskee, kun muotti avataan, kappale poistetaan ja odotellaan seuraavan jakson alkamista. Jäähditysnesteen virtausprofiili, lämpötila, kanaviston rakenne, nesteen tyyppi ja muottiterästen ominaisuudet (lähinnä lämmönjohtavuusominaisuudet) vaikuttavat muotin lämpötiloihin.

Taulukko 1 – Tavallisenpolymeeriraaka-aineen sekä kahden muottimateriaalina käytetyn metalliseoksen ominaisuuksia.

	SL Vantico 5260	Alumiiniseos AlZn5Mg3Cu	Teräs – P20
<b>Kimmomoduuli</b>	600 - 800 MPa	72 MPa	2500 GPa
<b>Vetolujuus</b>	40 - 65 MPa	540 MPa	965-300 MPa
<b>Lämmönjohtavuus</b>	0.2 W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	120-150 W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	29-34 W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
<b>Lämpöpitenemiskerroin 20°C lämpötilassa</b>	105×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	23,6×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	12,8×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Jos jäähdytyskanavia ei ole suunniteltu oikein (Kuva 2), muotin liikkuvan ja kiinteän puolen pesien pintalämpötilat voivat olla erilaiset. Jos pesässä on suuri lämpötilaero muottipuoliskojen välillä, kappale voi vääntyillä ja muuttaa muotoaan. [6-8].

Hyvin suunniteltu jäähdytysjärjestelmä pitää muottipesän seinämän tasalämpöisenä sekä jäähdyttää pesään ruiskutetun polymeerin siten, että kiteytyminen tapahtuu toivotulla tavalla. Jäähdytysjärjestelmällä pitää löytää kompromissi sopivan lyhyen jaksonajan ja sopivan kiteytymisen välillä.



Kuva 2 – Kappaleen epätasainen jäähtyminen.

Kuvassa 2 esitetty tilanne johtaa siihen, että muotin kuumemmalla puolella muovautunut pinta kappaleessa kutistuu enemmän. Tällöin muodostuu sisäisiä jännityksiä ja kappale vääntyilee. [6, 9].

Muottipesässä olevat ulokkeet tarvitsevat jäähdytystä enemmän kuin urat ja syvennykset. Ulokkeisiin kertyy lämpöä tehokkaasti. Syvennyksistä lämpö siirtyy pois tehokkaammin, koska ympärillä on seinämään nähden enemmän lämpöä pois johtavaa materiaalia. Näistä syistä täytyy kiinnittää erityistä huomiota kulmakohtien muotoiluun ja lämmön poistamiseen näiltä alueilta. [10].

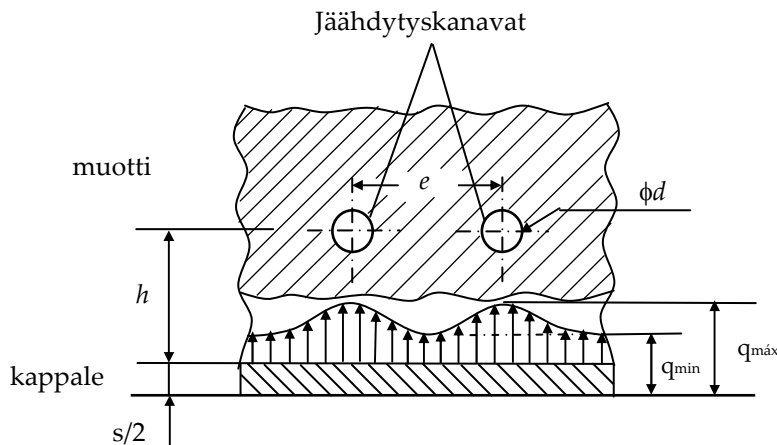
Jäähdytyskanavien halkaisija ja kanavien paikat on osittain lyöty lukkoon jo siinä vaiheessa, kun muut muotin osat on suunniteltu omille paikoilleen. Jäähdytyskanavistoa tulisi kuitenkin suunnitella myös itsenäisesti eikä vain osana, joka täytyy saada mahtumaan jonnekin. Tasapainotettu ja tasaisesti jäähdyttävä kanavisto parantaa valukappaleiden laatua. Kanavisto toimii tehokkaammin, jos sen sisällä oleva neste saadaan virtaamaan turbulently.

Kanavien sijoittelulla on suuri vaikutus siihen, jäähtyykö muottipesä tasaisesti [11, 12]. Kanavisto vaikuttaa valukappaleen pintalämpötiloihin, lämpötilajakaumiin ja jäähtymisen etenemiseen.

## Mitoitus

Jäähdytyskanavien suunnittelussa huomioidaan kolme mitta (katso kuva 3):

- Kanavan halkaisija (tai poikkipinta-ala, jos kanava ei ole pyöreä)
- Jäähdytyskanavien ja kappaleen pinnan välinen etäisyys ( $h$ )
- Jäähdytyskanavien välinen etäisyys ( $e$ )



Kuva 3 – Lämmönsiirtymisprofiili [13].

Käytännön sovelluksissa on tavallista käyttää seuraavia arvoja:

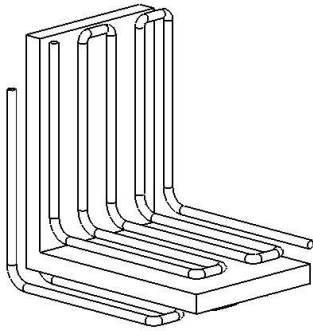
$$e = (2,5 - 3,5) d \text{ ja } h = (0,8 - 1,5) e$$

Jäähdytyskanavan halkaisija vaikuttaa kanavistossa tapahtuvaan painehäviöön. Painehäviö täytyy myös huomioida sen ohella, että lasketaan kanavan jäähdytysominaisuuksia. Lähteestä Zollner [14] löytyy kaava, jolla voidaan arvioida lämmityksen ja jäähtymisen suhdetta sekä ohjeistaa kanavien sijoittelua. Kaavan antaman tulokset tulisi olla 2,5 - 5% osakiteisille termoplasteille ja 5 - 10% amorfisille termoplasteille.

Ruiskuvaluprosessin jaksonaika määräytyy isolta osin kappaleen jäähtymiseen kuluvan ajan perusteella. Taloudellisuuskulmasta on erittäin tärkeää optimoida jäähtymiskierto ja pyrkiä lyhentämään jäähtymiseen kuluva aika niin pieneksi kuin mahdollista. Muottipesän muotoa seuraavat jäähdytyskanavat ovat jäähdytysteholtaan paremmat kuin suorat kanavat, joilla etäisyys muottipesästä vaihtelee. Muotoa seuraavilla kanavilla on voitu lyhentää jäähtymisaikoja huomattavasti. Lähteessä Wohlers [15] mainitaan, että jäähtymiseen kuluva aika on mahdollista lyhentää jopa 20%. Lähteessä Dimla ym. [10] kerrotaan sama asia hiukan toisin sanoin. Siellä mainitaan, että jaksonaika voidaan lyhentää merkittävästi, jos jäähtyminen tapahtuu samanaikaisesti kaikissa paikoissa muottipesää. Tämä on mahdollista, jos kanavisto tehdään muottipesän muotoa seuraavaksi. Joissakin tutkimuksissa on löydetty yhteys jaksonajan lyhenemisen ja muottipesän muotoa seurailevan kanavistorakenteen välillä. Merkittävin syy on se, että muottipesän pinta pysyy tällöin tasalämpöisenä.

**Muottipesän  
muotoa seuraileva  
kanavisto**

Kun kappale työnnetään muotista pois tasalämpöisenä, muotin ulkopuolella tapahtuva kutistuma tulee olemaan tasainen kaikkialla kappaleessa. Tällöin kappale ei vääntyile. Muotin temperoinnin päätavoitteena tulisi olla muottipesän ja kappaleen pinnan pitäminen mahdollisimman tasalämpöisenä, jotta kappaleeseen ei muodostu sisäisiä jännityksiä.



*Kuva 4 – Muottipesää seuraileva jäähdytyskanavisto. Menettely tehostaa lämmön siirtymistä pois muottipesästä sekä varmistaa, että kappale jäähtyy tasaisesti.*

Kun kappaletta on jäähdytetty riittävästi, se voidaan työntää ulos muotista. Suurin osa (95 %) kutistumasta tapahtuu muotissa ja se kompensoidaan uudella muottiin syötettävällä materiaalilla. Loppukutistuma tapahtuu jonkin ajan kuluessa siitä, kun kappale on poistettu muotista. [17]

Kun jäähdytyskanavat työstetään siten, että ne seuraavat muottipesän muotoa ja sen lisäksi poikkipinta-alaltaan sellaisiksi, että ne siirtävät lämpöä mahdollisimman tehokkaasti, saadaan lämpö siirrettyä nopeasti pois muottipesästä. Tämä auttaa vähentämään vääntyilyongelmia, koska kappale jäähtyy tasaisesti. Muotti saavuttaa sopivan työskentelylämpötilan nopeammin kuin tavanomaisilla poratuilla kanavilla varustettu muotti [18, 19].

## Lähteet

- [1] MENGES, G.; MOHREN, P. – How to Make Injection Moulds. 2<sup>nd</sup> ed, Hanser Publishers, 1993. ISBN 3-446-16305-0
- [2] LIMA, S. P. – Evaluation of the rapid prototyping incorporation in injection moulds, Master Thesis, October 2002.
- [3] POUZADA, A.S. – Heat transfer in injection moulds – Support texts to the Mould Design and Manufacturing Master Degree
- [4] BARROS, I.; TEIXEIRA, S.F.C.; TEIXEIRA, J.C.; CUNHA, A.M. – Evaluation of the thermal Behaviour of Injection Moulds. Intern. Polymer Processing, Vol. 15, No. 1 (2000), pp. 95-102.
- [5] BOELL, K.M. – Predicting the cooling time of an injection moulded part, Proceedings of the 53th Annual Technical Conference & Exhibition, ANTEC 1995, Boston, 7-11 May 1995, pp. 4242-4246.
- [6] MALLOY, ROBERT A.- Plastic part design for injection molding. New York: Hanser Publishers, 1994. 460 p. ISBN 1-56990-129-5.

- [7] WANG, T.J.; YOON, C. K. - Shrinkage and warpage analysis of injection-molded parts. Orlando: SPE ANTEC 2000, p. 687-692.
- [8] JOHANNABER, F. - Injection molding machines. Third Edition. New York: Hanser Publishers, 1994. 315 p. ISBN 1-56990-169-4.
- [9] MARTINHO, P.G. – Warpage study in injection moulding parts. University of Minho, Guimarães, 2002. 98p. Master Thesis
- [10] DIMLA, D.E.; CAMILOTTO, M.; MIANI, F. - Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools. Journal of Materials Processing Technology, 164–165, pp. 1294–1300, 2005.
- [11] SINGH, K. J. - Mold Cooling. In BERNHARDT, E. C. – CAE: Computer Aided Engineering for Injection Molding. Munich: Carl Hanser Verlag, 1983. ISBN 3-446-13950-8. p. 326-347.
- [12] YANG, S. Y.; CHANG, H. C.- Study on the performance of cooling systems in precision injection molds. Intern. Polym. Proc. Vol.10, n° 2 (1995), p. 255-261.
- [13] POTSCHE, G.; MICHAELI, W. - Injection molding: an introduction. Munich: Carl Hanser Verlag, 1995. 195 p. ISBN 1-56990-193-7.
- [14] ZOLLNER, O. - Optimised mould temperature control, Appl. Technol. Inform. (1997) 1104.
- [15] WOHLERS, T., Wohlers Report 2006 - Rapid prototyping and manufacturing - State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, Inc., 2006.
- [16] VOET, A.; PEE, B.V.; MINGNEAU, J.; CARDON, L.; HOUTEKIER, R. - Optimization of conformal cooling by use of “design of experiments”: industrial case study of an injection molded product, RPD 2006 – Building the future by innovation, Marinha Grande, 13-17 November 2006.
- [17] BRYCE, D.M. - Plastic Injection Moulding, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1996.
- [18] SACHS, E.; WYLONIS, E.; ALLEN, S.; CIMA, M.; GUO, H. - Production of injection molding with conformal cooling channels using the three dimensional printing process, Polym. Eng. Sci., 2000, 40 (5), 1232–1247.
- [19] DELGARNÓ, K., W., Layer manufactured production tooling incorporating conformal heating channels for transfer moulding of elastomer compounds, Plastic Rubber Compos. 30 (8) (2001) 384–388.
- [20] HOLMAN, J.P. – Heat Transfer, New York: MacGraw Hill, Inc, 1989. ISBN 0-07-100487-4.
- [21] C-MOLD user’s manual, ACTechnology, Ithaca New York, 1997.