

## PENGUKURAN CACAT WARPAGE PADA PRODUK PLASTIK DENGAN CETAKAN BERSALURAN PENDINGIN TIPE LURUS DAN CONFORMAL

**Bambang Waluyo Febriantoko<sup>\*</sup>, Agung Setyo Darmawan**

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Surakarta 57102.

<sup>\*</sup>Email: bambang\_waluyo@ums.ac.id

### Abstrak

*Salah satu cara meningkatkan keakurasian dimensi dengan cara membuat cetakan yang mempunyai saluran pendingin yang merata, mengikuti kontur dari cavity, sehingga arah penyusutan produk pada siklus pendinginan dapat merata. Mold tipe solid yang selama ini digunakan mempunyai keterbatasan pada sistim saluran pendinginan. Saluran pendingin tipe conformal dapat dibuat menggunakan cetak resin yang dicampur serbuk logam yang didalamnya ada pipa mengikuti bentuk cavity. Penelitian ini akan membandingkan cacat warpage produk plastik yang dibuat dari dua tipe cetakan yaitu cetakan solid bersaluran pendingin lurus dan soft tooling bersaluran pendingin conformal. Analisa produk meliputi pengukuran warpage arah tinggi, diameter dalam, diameter luar dari produk berbentuk lingkaran pipih. Metode penelitian yang digunakan dengan membuat cetakan sebanyak 2 buah, terdiri dari cetakan bersaluran pendingin lurus dan bersaluran conformal tipe soft tooling. Tiap cetakan digunakan untuk membuat spesimen sebanyak 20 buah. Bahan plastik digunakan adalah Polypropylene (PP). Pengukuran kesilindrisan dilakukan dengan mengukur diameter luar dan dalam produk menggunakan jangka sorong. Pengamatan warpage dilakukan dengan mengamati hasil produk secara makro dan pengukuran dengan dial indikator. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa saluran pendingin tipe conformal soft tooling mempunyai kesilindrisan yang lebih baik dibanding cetakan bersaluran pendingin lurus. Cacat produk yang paling banyak pada jenis cetakan tipe solid bersaluran pendingin lurus.*

**Kata kunci:** conformal cooling, injeksi plastik, soft tooling, warpage.

## 1. PENDAHULUAN

Metode *rapid lamination* dalam pembuatan *rapid prototyping* sudah dikembangkan sejak beberapa tahun yang lalu. Pelopor metode laminasi ini diawali sejak tahun 1979 oleh Profesor Nakagawa yang dipublikasikan sejak tahun 1980 dengan aplikasi cetakan untuk baja, aluminium dan *soft tooling* (Himmer dkk, 1999; Chung dkk, 2003, Ferreiera dan Mateus, 2004). Dalam beberapa tahun kedepan mulai muncul beberapa grup penelitian selain Profesor Nakagawa, seperti dari grup Warwick University (Bryden, Wimpenny) yang mempunyai fokus pada laminasi plat baja baik skala kecil sampai pada industri dirgantara. Grup lainnya yang fokus pada *stereolithography* dan pengaruh penyusutan pada injeksi cetakan. Grup berikutnya dari Feriera dan Matheus, (2004) yang fokus pada *soft tooling* dan *rapid prototyping* untuk pengecoran.

Dalam usaha untuk mengaplikasikan pendinginan *conformal*, laminasi brazing bahan Aluminium yang dilakukan dengan memberikan *filler* ditengahnya dan diberi tekanan selama pemanasan pada suhu 610°C selama 1 jam telah terjadi *diffusion bonding* yang erat sehingga air pendingin tidak masuk ke dalam cetakan (Himmer dkk, 1999). Uji coba pada bahan *mild steel* dilakukan oleh Febriantoko & Tontowi (2005) dengan cara metode brazing *mild steel* dengan *filler* tembaga pada suhu 1100°C dengan waktu tahan di dalam furnace selama 30 menit . Bryden dkk (2000) melakukan brazing bahan *mild steel* dengan *filler* Ag-Cu-Zn-Sn pada tekanan 1,7 MPa dengan suhu 720°C. Laminasi menggunakan perekat *epoxy* yang diperlakukan pada beberapa kondisi lingkungan diteliti oleh Febriantoko & Tontowi (2005), menunjukkan bahwa hasil uji mekanik menunjukkan kekuatan lebih kecil dari metode brazing. Perbandingan kekuatan mekanik antara perekat *epoxy* dengan *filler* tembaga pada proses brazing diteliti oleh Partono & Febriantoko (2007) menunjukkan kekuatan tertinggi pada brazing, tetapi pada pengujian kebocoran air didapatkan perekat *epoxy* lebih unggul.

Uji coba yang telah dilakukan, pada beberapa aplikasi metode *rapid tooling* dengan cara laminasi lembaran plat baja akan mereduksi biaya sebanyak 54%, waktu pembuatan dapat dihemat sebanyak 33 % dibanding dengan metode konvensional (Wimpeny dkk, 2003; Bryden dkk, 2001)

Penggunaan pendinginan tipe *conformal* akan meratakan degradasi temperatur di dalam cetakan sehingga memungkinkan siklus pelepasan *core* dan *cavity* lebih cepat (Tari dkk, 2004). Xu dkk (2001) mengaplikasikan pendinginan *conformal* dengan cetakan dari 3D printing mendapatkan bahwa suhu pada cetakan dapat dikendalikan merata sejak awal sampai akhir proses injeksi serta lebih rendah dari cetakan berpendingin lurus. Pendinginan tipe *conformal* akan membuat proses fabrikasi cetakan lebih sulit, penggunaan *laser cutting* dalam memotong setiap *layer* lebih cepat dan akurat (Himmer dkk, 1999). Aplikasi *laser cutting* akan membuat ongkos pemrosesan menjadi mahal, terutama di Indonesia penggunaan *laser cutting* hanya ada pada industri besar. Pengembangan *rapid prototyping* dengan metode *hybrid*, yaitu gabungan dari *laser cutting* dan milling dikembangkan Jeng dan Lin, (2001), begitu pula dengan Choi juga mengadopsi metode *hybrid* (Choi dkk, 2001). *Layer milling* merupakan alternatif yang paling murah untuk aplikasi LST namun memerlukan plat baja yang lebih tebal dari pada *laser cutting* (Muller dan Kochan, 1999).

Perancangan sistem pendingin pada cetakan plastik dengan jumlah *cavity* banyak dapat didekati dengan menggunakan persamaan perpindahan panas konduksi dua dimensi yang diselesaikan dengan menggunakan metode *finite element* dengan bantuan komputer (Tang dkk, 1997). Namun metodologi yang dibuat masih terbatas pada analisa dua dimensi sehingga untuk produk dengan bentuk yang kompleks yang membutuhkan analisis secara tiga dimensi masih harus dikembangkan lebih lanjut.

Permasalahan yang umum pada industri injeksi plastik adalah cacat produk hasil. Prediksi penyusutan yang tepat akan menghasilkan komponen dengan kualitas dan kepresisian tinggi. Penyusutan dipengaruhi oleh penyusutan volume, aliran dari tegangan sisa beserta orientasinya, aliran dari kristalisasi dan perpindahan panas (Kwon dkk, 2006). Sistem pendinginan yang optimal akan menghasilkan gradien perpindahan panas yang merata dan akan berpengaruh pada produk hasil. Untuk mendapatkan penyusutan yang merata, pentingnya efisiensi sistem saluran pendingin. Saluran pendingin tipe *conformal* merupakan salah satu jenis yang efisien dalam mendinginkan produk secara merata. Penerapan sistem pendinginan *conformal* telah dicoba oleh beberapa peneliti. Fererira dan Mateus (2004) menggunakan metode *soft tooling* dengan resin *epoxy* untuk mencetak cetakan yang didalamnya ada saluran pendingin *conformal*. Pencetakan cetakan dengan *3D printing* dilakukan oleh Sachs dkk (2000), Xu dkk (2001), Dimla dkk (2005) dengan membuat *green body* dari serbuk paduan tembaga yang didalamnya ada saluran pendingin *conformal*. Guna mengaplikasikan sistem pendinginan *conformal* yang murah dapat dilakukan dengan cara laminasi plat baja yang disusun menjadi satu kesatuan.

Secara umum penyusutan pada proses injeksi plastik dibagi dalam tiga jenis : *In mold shrinkage* adalah penyusutan yang terjadi selama proses injeksi berlangsung sebelum plastik mengalami solidifikasi, *as mold shrinkage* adalah penyusutan yang terjadi sesaat setelah plastik dikeluarkan dari cetakan, *post shrinkage* adalah penyusutan yang terjadi setelah plastik disimpan serta telah mengalami *physical aging* dan rekristalisasi (Jansen dkk, 1998). Secara teoritis rumus penyusutan pada injeksi plastik diteliti oleh grup penelitian dari Jansen, (Jansen dkk, 1998a), (Jansen dkk, 1996), (Jansen dkk, 1998b), (Speranza, 2007), (Titomanlio, 1996). Grup peneliti yang kedua adalah dari grup Isayev yaitu Kwon dkk (2006), Kwon dkk (2005). Disamping diatas ada beberapa peneliti yang merujuk pada dua grup diatas yaitu Nezhad (2007), Fathi & Bahravest (2007), Pomeleau (2006), Alam & Kamal (2004).

Perhitungan penyusutan secara teoritis mengacu pada Speranza (2007):

$$S = \alpha_1 [\bar{T}_s(z) - \bar{T}_s(z)] - \beta_1 \bar{P}_s + \xi_1 [\bar{X}_c(z) - \bar{X}_s(z)] \quad (1)$$

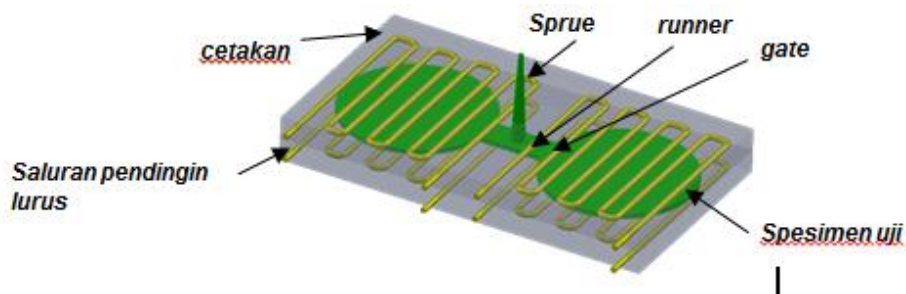
Penyusutan (S) digunakan sebagai notasi,  $\alpha$  merupakan koefisien linier ekspansi,  $\beta$  adalah *compressibility*,  $T_s$  adalah suhu *cavity*,  $T$  merupakan suhu udara sekitar,  $P_s$  adalah tekanan rata-rata didalam *cavity*,  $\xi$  merupakan jarak rata-rata kristal,  $X_c$  adalah derajat kristalisasi

*Warpage* dan *sinkmark* merupakan distorsi bentuk produk akhir proses injeksi plastik dikarenakan oleh perbedaan arah penyusutan pada waktu proses susut setelah injeksi (Fischer, 2003). *Warpage* sangat dipengaruhi oleh arah penyusutan yang tidak seragam pada waktu proses pendinginan produk. Arah penyusutan sangat dipengaruhi oleh distribusi panas oleh fluida pendingin, sehingga bentuk saluran pendingin akan berpengaruh pada *warpage*.

Tujuan penelitian ini adalah meneliti perbedaan cacat produk dari dua cetakan yang mempunyai saluran pendingin berbeda. Cetakan pertama merupakan cetakan dengan saluran pendingin lurus yang terbuat dari baja pejal. Cetakan kedua merupakan cetakan berpendingin *conformal* dengan metode *soft tooling*.

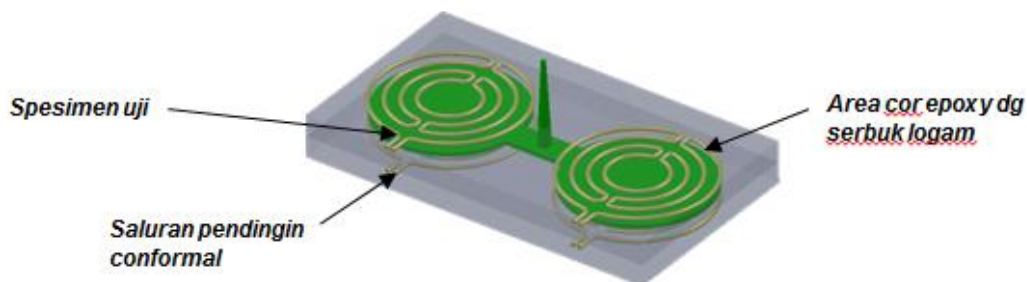
## 2. METODE PENELITIAN

Pembuatan cetakan saluran pendingin lurus. Pada tahap ini akan dibuat cetakan dengan tipe saluran pendingin lurus seperti pada kondisi cetakan yang sekarang banyak digunakan dengan aplikasi pada baja pejal yang dilubangi.



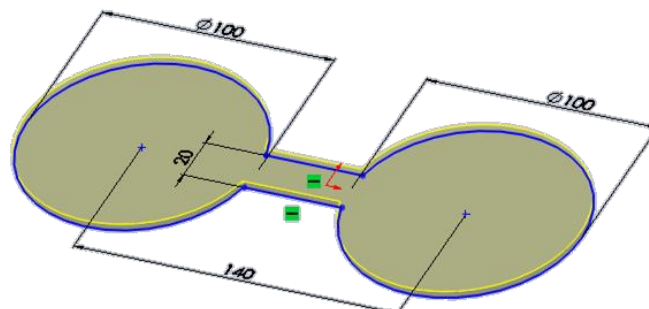
**Gambar 1. Skema saluran pendinginan tipe lurus didalam cetakan**

Pembuatan cetakan saluran *conformal* dengan Proses *soft tooling* dibuat dengan mencampur lem *epoxy* dengan serbuk logam yang kemudian dituang dalam cetakan yang mana terdapat saluran pendingin *conformal* terbuat dari pipa tembaga.



**Gambar 2. Skema pembuatan cetakan tipe soft tooling**

Variasi suhu proses injeksi plastik. Tahap ini dari kedua cetakan yang telah dibuat dilakukan proses injeksi dengan mesin kapasitas 10 ton dengan melakukan variasi suhu pada plastik yang dicairkan pada suhu 155°C, 160°C, 165°C. Bahan yang digunakan *Polypropylene (PP)*. Produk yang dibuat terlihat pada Gambar 3.



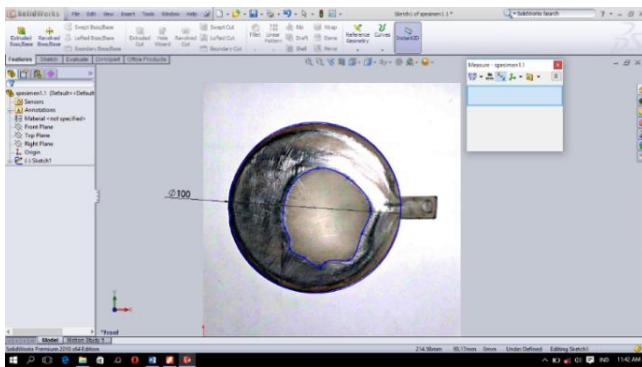
**Gambar 3. Sketsa gambar spesimen yang akan diuji ASTM D955**

Variasi tekanan injeksi plastik. Pengujian ini dilakukan dengan melakukan variasi tekanan injeksi pada mesin pada dua varian untuk menentukan waktu pengisian yang optimal pada produk. Diujikan pada kedua cetakan yang telah dibuat pada tahap sebelumnya.

### 2.1. Pengukuran Warpage

Pengukuran area *warpage* dengan pemrosesan gambar spesimen menggunakan *software solidworks* dan pengukuran besarnya nilai *warpage* menggunakan dial indicator. Tahap pengukuran area *warpage* dengan pemrosesan gambar spesimen menggunakan *software solidworks* sebagai berikut:

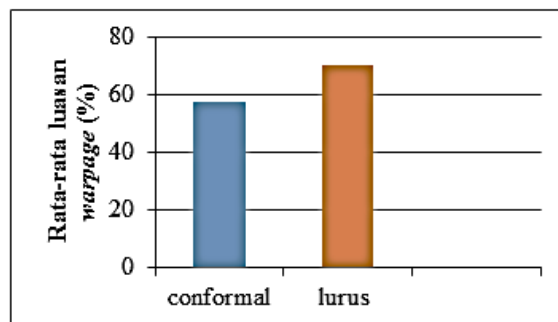
- a) Pengukuran area *warpage* menggunakan pemrosesan gambar spesimen menggunakan *software solidworks*. Gambar spesimen diskala sehingga ukuran gambar spesimen sama dengan ukuran spesimen yang sebenarnya. Setelah itu pada area *warpage* dibuat *sketch* menggunakan alat *sketch* yang terdapat pada *software solidworks*. Gambar 4 merupakan sampel pembuatan *sketch* pada area *warpage* spesimen no.



Gambar 4. Pengukuran luasan *warpage* dan pengukuran nilai *warpage*

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran luasan *warpage* pada tekanan injeksi sebesar  $6.37 \text{ kg/cm}^2$  dapat dicermati pada gambar 5.



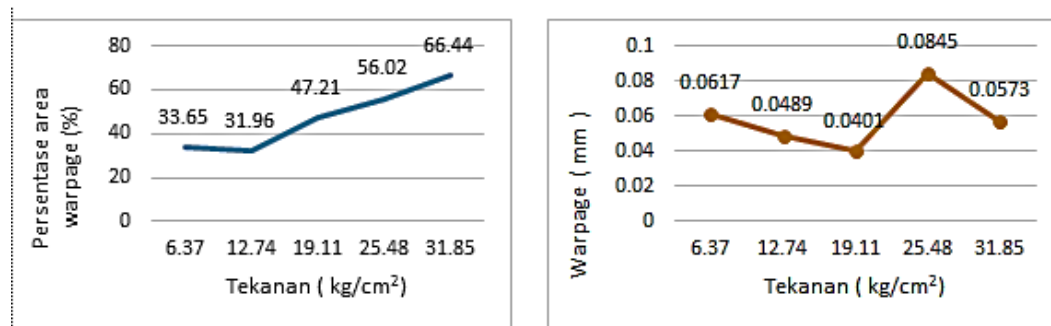
Gambar 5. Histogram perbandingan (%) *warpage* sistem pendinginan *conformal soft tooling* dan sistem pendinginan lurus *soft tooling*.

Dari gambar 5 didapat data *warpage* yang terjadi pada pendinginan *conformal soft tooling* rata-rata sekitar 57,65% dan pada pendinginan lurus *soft tooling* rata-rata sekitar 73,02%. Hal ini menunjukkan sistem saluran pendingin conformal lebih sedikit terjadinya area *warpage*.

### 3.1. Pengaruh Tekanan Terhadap Warpage

Dengan menaikkan nilai tekanan dari  $6.37 \text{ kg/cm}^2$  menjadi  $12.74 \text{ kg/cm}^2$  area *warpage* yang terjadi turun 1.33 %. Sedangkan dari tekanan  $12.74 \text{ kg/cm}^2$  menjadi  $19.11 \text{ kg/cm}^2$  area *warpage*

yang terjadi tidak turun namun naik 11.97 %. Dan dari tekanan 19.11 kg/cm<sup>2</sup> menjadi 25.48 kg/cm<sup>2</sup> area warpage yang terjadi semakin bertambah besar yaitu 6.92 %. Hingga dari tekanan 25.48 kg/cm<sup>2</sup> menjadi 31.85 kg/cm<sup>2</sup> area warpage yang terjadi semakin bertambah besar 8.18 %.



**Gambar 6. Pengaruh tekanan terhadap persentase area dan warpage**

Berdasarkan Gambar 6 menunjukkan bahwa dengan menaikkan dan menurunkan nilai tekanan akan berpengaruh terhadap besarnya presentase warpage yang terjadi. Pada tekanan yang rendah persentase warpage yang terjadi juga kecil dan pada tekanan yang tinggi persentase warpage yang terjadi juga semakin besar. Sehingga dari grafik diatas dapat diambil sebuah kesimpulan bahwa secara umum menaikkan tekanan injeksi membuat persentase warpage yang terjadi semakin besar begitu juga sebaliknya, namun ada tekanan optimal dimana pada tekanan tersebut persentase warpage yang terjadi paling kecil yaitu pada tekanan 12.74 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4. KESIMPULAN

Penggunaan cetakan tipe saluran conformal dapat menurunkan nilai warpage dari pada saluran pendingin tipe lurus. Pengaruh tekanan terhadap warpage yaitu dengan naiknya tekanan pada kondisi optimal angka warpage akan berada pada kondisi terkecil. Namun apabila tekanan dinaikkan kembali justru akan meningkatkan nilai warpage.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima Kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jendral Penguatan Riset dan Pengembangan kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah membiayai riset ini dengan No. 006/SP2H/LT/DRPM/II/2016 tanggal 17 Februari 2016.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Alam K., Kamal M.R., 2004, Runner Balancing by a Direct Genetic Optimization of Shrinkage, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 44, Iss 10, pp 1949
- Bryden, B.G., Pashby, I.R., 2001, Hot Platen Brazing to Produce Laminated Steel Tooling, *Journal of Material Processing Technology* 110 206-210
- Bryden, B.G., Pashby, I.R., Wimpenny, D.I., Adams, C., 2000, Laminated Steel Tooling in Aerospace Industry, *Material and Design* 21 403-408
- Chester, R.J., Roberts, J.D., 1989, Void Minimization in Adhesive Joints, *Journal Adhesion and Adhesives*, Vol. 9 No3.
- Dimla D.E, Camilotto M., Miani F. , 2005, Design and Optimization of Conformal Cooling Channel in Injection Moulding Tools, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1294-1300
- Fathi S., Bahravesh A.H., 2007, Visualization of in Mold Shrinkage in Injection Molding Process, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 47, Iss 5, pp 750
- Febriantoko B.W., Tontowi A. E., 2005 Pengaruh Plastik Cair dan Suhu Air Rendaman Pada Kekuatan Mekanis Laminasi Plat Baja, *Prosiding Seminar Nasional Ilmu dan Teknologi Bahan*, UGM Yogyakarta

- Febriantoko B.W., Tontowi A. E., 2005, Perbandingan Metode Laminasi Adhesive Bonding Dan Brazing Pada Plat Baja Untuk *Mold* Mesin Injeksi Plastik, *Prosiding Simposium Nasional Rekayasa, Aplikasi dan Perencanaan Industri*, UMS Surakarta
- Ferreira, J.C., Mateus, A., 2004, Studies of Rapid Soft Tooling With Conformal Cooling Channels for Plastic Injeksi Molding, *Journal of Material Processing Technology* 142 508-516
- Fischer, J.M., 2003, *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*, Plastic Desig Library
- Harper, C.A., 1996, *Handbook of Plastics, Elastomers and Composites*, McGraw-Hill
- Himmer, T., Nakagawa, T., Anzai, M., 1999, Lamination of Metal Sheets, *Computer in Industry* 39 27-33
- Jansen K.M.B., Pantani R., Titomanlio G., 1998, As-Molded Shrinkage Measurement on Polystyrene Injection Molded Products, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, Iss 2, pp 254
- Jansen K.M.B., Titomanlio G., 1996, Effect of Pressure History on Shrinkage and Residual Stresses-Injection Molding With Constrained Shrinkage, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, Iss 15, pp 2029
- Jansen K.M.B., Van Dijk D.J., Husselman M.H., 1998, Effect of Processing Condition on Shrinkage in Injection Molding, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, Iss 5, pp 838
- Jeng, J.Y. dan Lin, M.C., Mold Fabfication and Modification Using Hybrid Processes of Selective laser Cladding and Milling, 2001, *Journal of Material Processing Technology* 110 98-103
- Kwon K. , Isayev A.I. , Kim K.H., 2006, Theoretical and Experiment Studies of Anisotropic Shrinkage in Injection Molding of Various Polyester, *Journal of Applied Polymer Science*, Vo. 102, pp 3526-3544
- Kwon K., Isayev A.I., Kim K.H., 2005, Toward a Viscoelastic Modeling of Anisotropic Shrinkage in Injection Moldin of Amorphous Polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, Vo. 98, pp 2300-2313
- Mueller, B.dan Kochan, D., 1999, Laminated Object Manufacturing for Rapid Tooling and Pattermaking in Foundry Industry, *Computers in Industry* 39 47-53
- Muller, H. dan Sladojevic, J. 2001, Rapid tooling approaches for Small lot Production of Sheet metal parts, *Journal of Material Processing Technology* 115 97-103
- Partono P., Febriantoko B.W., 2007, Pengaruh Jenis Perekat Terhadap Kekuatan Mekanis Sambungan Laminasi Plat Baja Untuk Bahan Pembuat Mold Mesin Injeksi Plastik, *Proceeding of the Research and Studies VI, TPSDP (ADB Loan no 1792-INO) DIKTI*
- Pomerleau J., Sanschagrin B., 2006, Injection Molding Shringkage of PP: Experiment Progress, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 46, Iss 9, pp 1275
- Sachs E., Wylonis E. , Allen S., Cima M., Guo H., 2000, Production of Injection Molding Tooling With Conformal Channels Using the Three Dimensional Printing Process, *Polymer Engineering Science*, Vol. 40, Iss. 5, pp. 1232
- Shelesh-Neshad K, A. Taghizadeh, 2007, Shrinkage Bahaviour and Mechanical Performance of Injection Molded Polypropylene/Talc composites, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 47, Iss 12, pp 2124
- Speranza V., Pantani R., Besana G.B., Titomanlio G., 2007, Anisotropic Shrinkage of Injection Molded PolyVinylidene Flouride Samples, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 47, Iss 11, pp 1788
- Tari, M.J., Bals, A., Park, J., Lin, M.Y., Hahn, H.T., 1998, Rapid Prototyping of Composite parts Using Resin Transfer Molding and laminated Object Manufacturing, *Composites Part A* 29A 651-661
- Titomanlio G., Jansen K.M.B., 1996, In-Mold Shrinkage and Stress Prediction in Injection Molding, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, Iss 15, pp 2041
- Wimpenny, D.I., Bryden, B., Pashby, I.R., 2003, Rapid Laminated Tooling, *Journal of Material Processing Technology* 138 214-218
- Xu X., E. Sachs, S. Allen, 2001, The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling, *Polymer Engineering Science*, Vol. 41, Iss. 7, pp. 1265