

Desain Eksperimen untuk Mengoptimalkan Proses Pengecoran Saluran Keluar Teko

Gan Shu San
Soejono Tjitro

Dosen Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Mashuri Santoso

Alumnus Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Kondisi cacat yang paling banyak dijumpai pada proses pengecoran saluran keluar teko adalah lubang saluran keluar pada ujung teko yang terlalu sempit bahkan tertutup di akhir proses pengecoran. Banyak faktor yang mempengaruhi proses pengecoran ini sehingga menyebabkan cacat tersebut. Kondisi cacat ini dapat direpresentasikan dengan ketebalan dari produk cor saluran keluar teko. Pada makalah ini akan dianalisa faktor yang paling signifikan mempengaruhi ketebalan saluran teko hasil cor.

Metode yang digunakan adalah metode desain eksperimen khususnya metode desain faktorial untuk menentukan faktor-faktor yang signifikan serta kondisi optimumnya dan metode *response surface* untuk mendapatkan model pendekatan untuk ketebalan saluran teko sebagai fungsi dari faktor-faktor tersebut sehingga dapat diperoleh kondisi keseluruhan yang paling optimal.

Dari analisa hasil eksperimen ini ditemukan bahwa faktor yang signifikan terhadap ketebalan adalah temperature tuang, radius *sprue* dan *holding time*. Dapat pula disimpulkan bahwa kondisi optimum dari factor-faktor tersebut adalah temperatur tuang 475°C, radius *sprue* 29.6 mm dan *holding time* 8 detik yang menghasilkan ketebalan sebesar 2.54 mm.

Kata kunci : pengecoran, desain eksperimen, desain faktorial, *response surface*, optimasi.

Abstract

The most frequently found defect in the casting process of making teapots out flue is that the outlet is too narrow or even blocked at the end of the casting process. There are many factors influence that defect. This defect condition can be represented as the thickness of the casting product. In this paper, the significant factors that influence the thickness of the out flue resulted from the casting process will be analyzed and further got their optimum conditions.

Design experiments methods will be implemented here, especially the factorial design method to determine the significant factors along with their optimum conditions. Also, the response surface method will be applied to obtain the approximation model for the thickness of the out flue as a function of the factors found earlier so that the most optimal result can be obtained under a design optimization method.

It is concluded from the experiments results and analysis that the significant factors for the thickness of out flue are pouring temperature, sprue radius and holding time. The optimum conditions of those factors are 475°C, 29.6 mm and 8 seconds respectively with 2.54 mm thickness.

Keywords : casting, experiment design, factorial design, response surface, optimization

1. Pendahuluan

Pada pembuatan teko, saluran keluaranya dibuat dengan proses pengecoran. Pada proses ini

kurang lebih 20% dari produk yang dihasilkan mengalami cacat dimana lubang saluran keluar pada ujung teko terlalu sempit bahkan tertutup diakhir proses pengecoran. Hal ini akan menyebabkan proses produksi terhambat dan secara tidak langsung akan mempengaruhi biaya produksi. Adapun faktor yang berpengaruh dalam

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2003. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 5 Nomor 2 Oktober 2003.

pembuatan atau pengecoran ini antara lain faktor kecepatan pembekuan logam, temperatur penuangan logam cair, temperatur cetakan, pola cetakan, temperatur pelebur logam cair, waktu tunggu pembekuan (sebelum logam sisa dibuang), kecepatan pembuangan logam sisa, dan lain-lain. Dengan menerapkan metode desain eksperimen khususnya metode desain faktorial, dapat dianalisa faktor-faktor yang paling signifikan serta dapat dihasilkan kondisi optimum faktor-faktor tersebut. Manfaatnya adalah bahwa hasil akhir produk pengecoran dapat memenuhi standar yang telah ditentukan dan dapat mengurangi penggunaan material serta penelitian menjadi lebih efisien.

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah timah dengan kadar Sn lebih dari 90 % dengan komposisi yang sudah standar sehingga tidak dimungkinkan adanya perubahan komposisi. Hasil yang diamati pada percobaan ini adalah ukuran ketebalan coran pada bagian ujung saluran keluar teko dan diinginkan setipis mungkin namun tidak kurang dari 2,5 mm.

2. Metodologi Penelitian

- Melakukan survey di pabrik pembuatan teko untuk mengetahui proses pembuatan secara lebih detil serta mengamati faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil pengecoran.
- Menentukan faktor-faktor apa saja yang berpengaruh pada hasil pengecoran dengan menggunakan *fishbone diagram*.

Diagram sebab-akibat (*cause and effect diagram* atau *fishbone diagram*) adalah sebuah teknik grafis yang digunakan untuk mengurutkan dan menghubungkan interaksi antara faktor-faktor yang berpengaruh dalam suatu proses. Diagram ini berguna untuk menganalisa dan menemukan faktor-faktor yang berpengaruh atau efek secara signifikan di dalam menentukan karakteristik kualitas output kerja. Efek ini bisa bernilai "baik" dan bisa bernilai "buruk".

- Memilih desain eksperimen yang akan dilakukan.

Desain eksperimen adalah alat penting dalam dunia teknik untuk meningkatkan kinerja dari proses produksi. Selain penerapan teknik-teknik desain eksperimen pada awal pengembangan proses produksi, desain eksperimen juga digunakan sebagai metode dalam membuat suatu desain untuk suatu produk baru atau memperbaiki yang sudah ada. Beberapa aplikasi dari metode desain eksperimen dalam hal dunia teknik antara lain :

- Evaluasi dan perbandingan dari beberapa konfigurasi desain dasar.
- Evaluasi dari beberapa alternatif bahan baku.
- Pemilihan dan penentuan parameter-parameter desain sehingga proses dapat berjalan baik dalam berbagai kondisi yang beraneka ragam dan mutu produk tetap terjaga.

Ada dua aspek eksperimen, yaitu desain eksperimen dan analisa statistik data. Desain eksperimen statistik adalah proses perancangan eksperimen untuk mengumpulkan data yang tepat sehingga dapat dianalisa dengan menggunakan metode statistik, sehingga kesimpulan yang diperoleh bersifat obyektif dan valid. Aplikasi desain eksperimen dalam dunia teknik antara lain untuk peningkatan kinerja proses manufaktur, pengembangan proses baru maupun produk baru serta peningkatan kinerja produk.

- Menentukan faktor yang diduga dominan serta melakukan perancangan desain eksperimen.
- Melakukan eksperimen untuk mengambil data.
- Mengolah dan melakukan analisan dari data yang diperoleh pada eksperimen.
- Melakukan eksperimen dan analisa kembali apabila diperlukan.

3. Rancangan Percobaan

Masalah yang akan dianalisa adalah ketebalan dari produk cor saluran keluar teko untuk dioptimalkan dengan nilai ketebalan tertentu.

3.1 Fishbone Diagram

Kategori utama penyebab masalah yaitu:

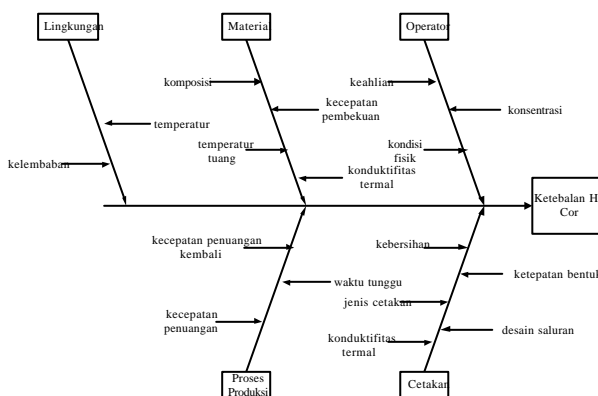
a. Kategori material

Pada kategori ini, faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan hasil pengecoran meliputi komposisi, temperatur penuang, konduktifitas termal dan kecepatan pembekuan dari material. Temperatur peleburan dari timah tergantung dari komposisi utama dan komposisi paduan dari material tersebut. Kecepatan pembekuan dari timah tergantung pada temperatur pada saat penuangan logam cair dan konduktifitas termal dari material. Semakin rendah temperatur tuang dari logam cair dan semakin besar konduktifitas termal material dan cetakan maka akan mempercepat pembekuan dari logam cair. Untuk mengetahui seberapa cepat logam cair itu membeku sulit untuk dieksperimentasikan. Temperatur

penuang dari timah dengan kadar Sn lebih dari 90% sekitar 440°C.

- b. Kategori cetakan
Kategori ini sangat berpengaruh terhadap hasil akhir pengecoran. Ada beberapa faktor yang berpengaruh terhadap hasil pengecoran seperti jenis cetakan, desain saluran atau sistem saluran, konduktivitas termal dari cetakan, ketepatan bentuk cetakan dan kebersihan dari cetakan yang digunakan.
- c. Kategori proses produksi
Dalam kategori ini faktor yang berpengaruh terhadap ketebalan hasil pengecoran adalah kecepatan penuangan logam cair, waktu tunggu pembekuan material (*holding time*) di dalam rongga cetak dan kecepatan penuangan kembali sisa material yang masih cair.
- d. Kategori operator
Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil akhir dari pengecoran adalah keahlian operator dalam proses produksi, konsentrasi operator saat melakukan pengecoran dan kondisi fisik operator saat melakukan pengecoran.
- e. Kategori lingkungan
Dalam kategori ini faktor yang berpengaruh adalah temperatur di dalam pabrik yang tidak secara langsung akan berpengaruh terhadap unjuk kerja operator dan temperatur cetakan. Selain temperatur, kelembaban udara lingkungan di dalam pabrik juga berpengaruh.

Dari *fishbone diagram* di bawah ini ditentukan 3 faktor yang diduga dominan yaitu temperatur penuangan, desain saluran dan waktu tunggu (*holding time*).



Gambar 1. *Fishbone Diagram* untuk Ketebalan Hasil Cor

Kategori operator tidak dipilih karena merupakan faktor yang tidak dapat diukur secara kuantitatif dan presisi, namun pengaruhnya dapat diminimalkan dengan menggunakan satu orang operator saja selama percobaan berlangsung. Kategori lingkungan

juga tidak ekonomis untuk dipertimbangkan karena karena pengecoran dilakukan pada temperatur ruang. Untuk meminimalkan pengaruh lingkungan maka percobaan dilakukan pada temperatur dan kelembaban yang relatif sama.

3.2 Rancangan Desain Eksperimen

- Variabel respon adalah ketebalan saluran keluar teko yang merupakan variabel kuantitatif.
Salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh saluran keluar teko adalah ketebalan dari dinding saluran keluar teko yang tidak boleh lebih dari setengah diameter ujung teko. Ketebalan produk cor diperoleh dengan cara percobaan dan untuk mengukur ketebalannya maka produk dipotong sejajar dengan *parting line* dan diukur ketebalannya pada bagian ujung coran dengan menggunakan jangka sorong.
- Variabel bebas atau faktor
Dari diagram sebab-akibat, dipilih faktor yang menjadi model dari desain eksperimen:
 - a. Temperatur tuang, selanjutnya dikodekan dengan A.
 - Nilai standar (maksimum) : 475°C
 - Jumlah level tiga (a=3)
 - Nilai tengah : 465°C
 - Nilai minimum : 455°C
 - b. Radius sprue, selanjutnya dikodekan dengan B.
 - Nilai standar (maksimum) : 35 mm
 - Jumlah level tiga (b=3)
 - Nilai tengah : 27 mm
 - Nilai minimum : 25 mm
 - c. Holding time, selanjutnya dikodekan dengan C.
 - Nilai standar (minimum): 8 detik
 - Jumlah level tiga (c=3)
 - Nilai tengah : 12 detik
 - Nilai maksimum : 16 detik
- Rancangan desain eksperimen yang dipilih adalah rancangan desain faktorial 3 level dengan 3 faktor. Ditentukan jumlah replikasi sebanyak 3 kali (n=3).
Dari jumlah level tiap faktor maka kombinasi perlakuan akan ada sebanyak 27 kombinasi perlakuan dan jumlah observasi sebanyak 81 run.

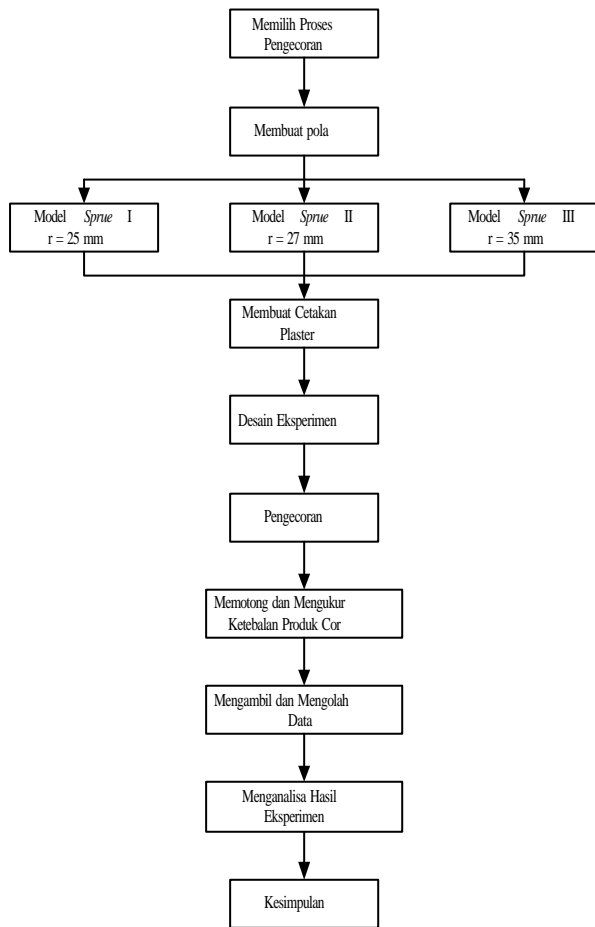
Kode level untuk masing-masing level dari tiap faktor dapat dilihat pada Tabel 1. Urutan dari percobaan ini dilakukan secara acak untuk memenuhi prinsip dasar dari desain eksperimen yaitu randomisasi

Tabel 1. Kode Level untuk Masing-Masing Level dari Tiap Faktor

FAKTOR	LEVEL		
	0	1	2
Temperatur Tuang (°C)	455	465	475
Radius Sprue (mm)	25	27	35
Holding Time (detik)	8	12	16

4. Percobaan Dan Analisa

4.1 Prosedur Percobaan dan Pengambilan Data



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Tabel 2. Data Hasil Percobaan

HOLDING TIME (detik)	455°C			465°C			475°C		
	25 mm	27 mm	35 mm	25 mm	27 mm	35 mm	25 mm	27 mm	35 mm
8	2.84	2.76	2.94	2.76	2.88	2.84	2.7	2.56	2.76
	2.86	2.76	2.92	2.78	2.7	2.86	2.72	2.54	2.78
	2.86	2.76	2.94	2.76	2.88	2.86	2.72	2.56	2.78
12	2.96	2.86	3.12	2.84	2.78	2.96	2.78	2.74	2.9
	2.94	2.86	3.14	2.86	2.78	2.96	2.8	2.74	2.92
	2.96	2.86	3.14	2.86	2.8	2.98	2.8	2.72	2.9
16	3.1	3	3.32	2.98	2.94	3.24	2.92	2.84	3.16
	3.12	2.98	3.32	3	2.92	3.26	2.94	2.86	3.16
	3.12	2.98	3.34	2.98	2.92	3.24	2.94	2.84	3.16

nilai ketebalan dalam satuan mm

4.2 Pengolahan Data

Untuk mengetahui apakah variabel percobaan ini berpengaruh terhadap respon (output) maka dilakukan analisa statistik dengan *Balanced Anova* dengan 2 faktor, yaitu faktor temperatur tuang (A), radius sprue (B), dan holding time (C) dan respon-nya adalah ketebalan produk cor. Pengolahan data menggunakan Minitab 11.12.

Analysis of Variance (Balanced Designs)

Factor	Type	Levels	Values
Temp	fixed	3	455 465 475
Radius	fixed	3	25 27 35
Time	fixed	3	8 12 16

Analysis of Variance for Thicknes

Source	DF	SS	MS	F	P
Temp	2	0.38087	0.19043	559.41	0.000
Radius	2	0.79340	0.39670	1165.32	0.000
Time	2	1.17302	0.58651	1722.89	0.000
Temp*Radius	4	0.00464	0.00116	3.41	0.014
Temp*Time	4	0.00378	0.00095	2.78	0.034
Radius*Time	4	0.07880	0.01970	57.87	0.000
Error	62	0.02111	0.00034		
Total	80	2.45562			

Dari hasil anova, dengan tingkat signifikansi 5%, maka dapat dilihat bahwa faktor A, B, C serta interaksi BC, nilai $F > F_{tabel}$ sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap ketebalan.

Untuk mengetahui seberapa banyak variabilitas respon disebabkan oleh faktor-faktor dalam eksperimen, baik itu sebagai *main effect* maupun sebagai *interaction effect* maka dilakukan perhitungan koefisien determinasi (R^2).

$$SS_{model} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{BC}$$

$$= 0.38087 + 0.79340 + 1.17302 + 0.07880$$

$$= 2.42609$$

$$R^2 = SS_{model} / SS_t = 0.98797 = 98.8\%$$

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa 98.8% dari variabilitas ketebalan produk cor dijelaskan oleh faktor temperatur tuang, faktor radius sprue dan faktor holding time serta interaksi radius sprue dan holding time.

4.3 Regresi Response Surface

Setelah diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi ketebalan produk cor maka dilakukan analisa *response surface* untuk menentukan nilai faktor tersebut yang paling optimal.

Response Surface Regression

Estimated Regression Coefficients for Thickness

Term	Coef	StDev	T	P
Constant	38.1728	11.5607	3.302	0.002
Temp	-0.1166	0.0495	-2.353	0.021
Radius	-0.4133	0.0394	-10.487	0.000
Time	-0.1006	0.0448	-2.246	0.028
Temp*Temp	0.0001	0.0001	2.227	0.029
Radius*Radius	0.0075	0.0004	21.359	0.000
Time*Time	0.0016	0.0003	4.732	0.000
Temp*Radius	-0.0001	0.0001	-1.451	0.151
Temp*Time	0.0001	0.0001	0.886	0.379
Radius*Time	0.0021	0.0002	11.774	0.000

S = 0.02258 R-Sq = 98.5% R-Sq(adj) = 98.3%

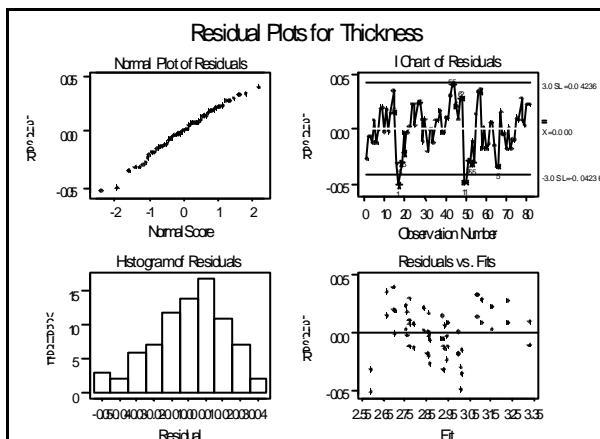
Analysis of Variance for Thickness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	2.41943	2.419430	0.268826	527.13	0.000
Linear	3	2.10077	0.060413	0.020138	39.50	0.000
Square	3	0.24652	0.246519	0.082173	161.19	0.000
Interaction	3	0.07214	0.072141	0.024047	47.17	0.000
Residual Error	71	0.03619	0.036195	0.000510		
Lack-of-Fit	17	0.02899	0.028995	0.001706	12.79	0.000
Pure Error	54	0.00720	0.007200	0.000133		
Total	80	2.45562				

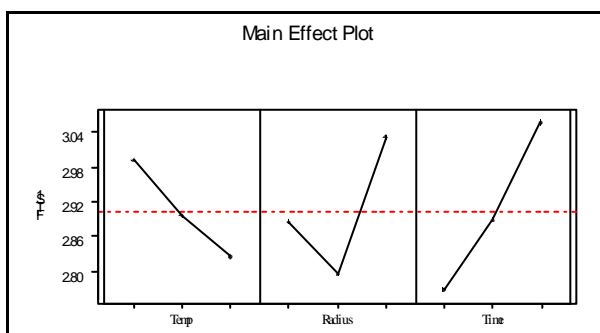
Unusual Observations for Thickness

Obs	Thickness	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
17	2.540	2.592	0.008	-0.052	-2.47R
49	2.960	3.010	0.007	-0.050	-2.32R
50	2.960	3.010	0.007	-0.050	-2.32R

R denotes an observation with a large standardized residual



Gambar 3. Residual Plot untuk response surface regression

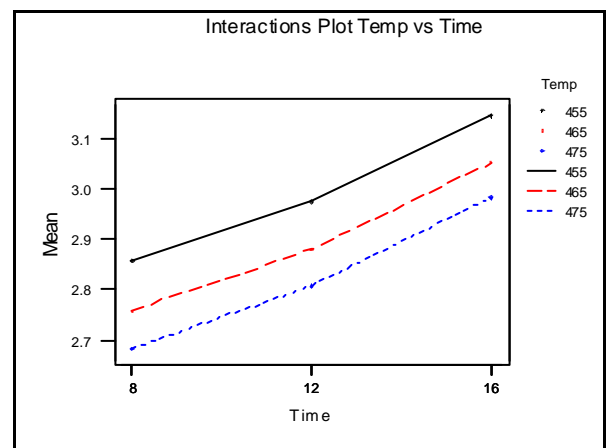
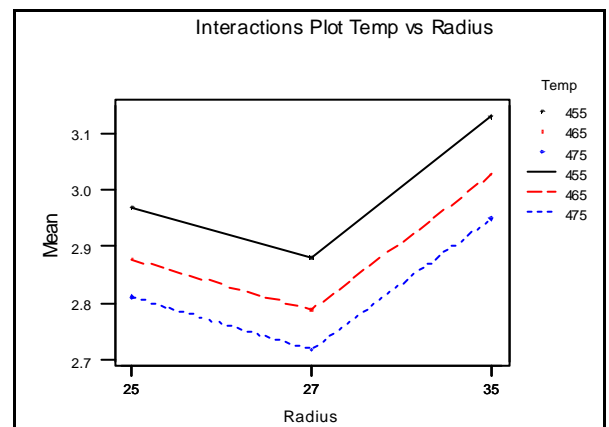


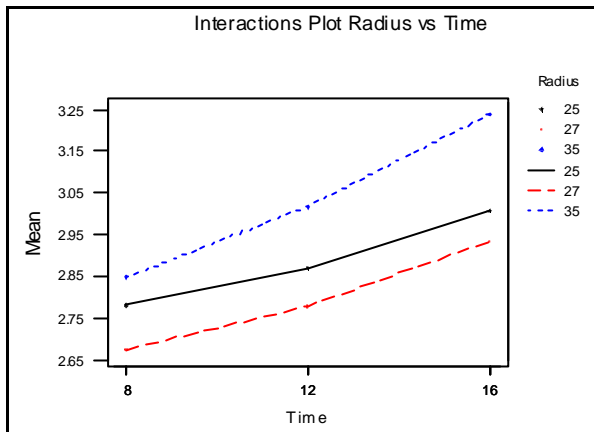
Gambar 4. Main Effect Plot untuk Ketebalan Hasil Cor

Gambar 3 yaitu residual plot menunjukkan bahwa data telah random dan sesuai dengan distribusi normal. Sedangkan grafik main effect pada gambar 4 menunjukkan bahwa ketebalan minimal diperoleh saat temperatur tuang 475, radius sprue 27 mm dan holding time 8 detik dengan ketebalan hasil cor sebesar 2.55 mm menurut hasil percobaan.

Perbedaan temperatur yang cukup besar antara temperatur tuang (475°C) dengan titik liquidus timah (232°C) akan memberikan waktu cukup lama bagi logam cair sebelum mulai membeku. Penurunan temperatur setelah melewati titik liquidus dari logam cair akan menumbuhkan inti-inti kristal dan jika temperatur semakin menurun menuju titik solidusnya maka inti-inti kristal akan semakin tumbuh dan membesar sehingga akhirnya akan terbentuk butir kristal. Semakin banyak butir kristal yang terbentuk maka semakin tebal produk cor yang dihasilkan. Jadi semakin tinggi temperatur tuang dari logam cair dan semakin besar selisih temperatur penuangan terhadap titik liquidus logam serta lama waktu yang diberikan logam untuk membeku akan mempengaruhi ketebalan dari logam tersebut.

Sprue dengan radius 27 mm memiliki bentuk yang lebih smooth dan memungkinkan logam cair lebih mudah mengalir dibanding dengan model yang lain. Pada desain model ini kemungkinan terjadinya turbulensi aliran sangatlah kecil bahkan tidak terjadi. Kemudahan bagi logam cair untuk mengalir akan memberikan kesempatan bagi logam cair cepat masuk ke rongga cetak dan mengalami pembekuan sebelum dikeluarkan kembali.





Gambar 5. Interactions Plot untuk Ketebalan Hasil Cor

Gambar 5 menunjukkan *interactions plot* antara faktor-faktor tersebut dan dapat dilihat bahwa interaksi yang signifikan mempengaruhi ketebalan hasil cor adalah interaksi antara radius *sprue* dan *holding time* sedangkan pengaruh interaksi temperatur tuang dan *holding time* serta interaksi antara temperatur tuang dan radius *sprue* ternyata kecil. Hal ini disebabkan saat pengecoran, logam cair yang berada di dalam rongga cetak hanya berada pada fase *liquid* dan dengan perlakuan *holding time* yang singkat belum terbentuk inti kristal.

Analisa *respon surface* yang dilakukan dengan Minitab 11.12 tersebut menggunakan model orde kedua menghasilkan model aproksimasi sebagai berikut:

$$y = 39,0991314 - 0,1185926A - 0,4612672B - 0,0618155C + 0,0001185A^2 + 0,0075185B^2 + 0,0015741C^2 + 0,0020933BC + e$$

di mana:

- y adalah respon berupa angka ketebalan produk cor dalam mm.
- A adalah faktor temperatur tuang dengan nilai input pada persamaan ini bernilai 455°C sampai 475°C.
- B adalah faktor radius dari *sprue* dengan nilai input pada persamaan ini bernilai 25 mm sampai 35 mm.
- C adalah faktor lama *holding time* dengan nilai input pada persamaan ini bernilai 8 detik sampai 16 detik.
- e adalah *error*.

Ketebalan hasil cor yang dihitung melalui persamaan di atas pada kondisi optimum faktor (475°C, 27mm, 8 detik) adalah sebesar 2.59 mm.

Ketebalan cor yang diinginkan adalah setipis mungkin namun tidak kurang dari 2.5 mm. Oleh karena itu, model optimasi di atas diminimalkan dengan bantuan software MATLAB. Batas bawah yang diambil adalah temperatur 455°C, radius 25 mm dan waktu 8 detik,

sedangkan batas atas adalah 475°C, 35 mm, 16 detik. Hasil optimasi yang diperoleh adalah temperatur 475°C, radius 29.6 mm dan waktu 8 detik dengan ketebalan hasil cor sebesar 2.54 mm.

5. Penutup

Dari penelitian ini dan analisis yang telah diberikan dapat ditunjukkan bahwa faktor yang mempengaruhi ketebalan produk cor pada proses pembuatan saluran teko secara signifikan adalah temperatur tuang, radius *sprue* dan *holding time* serta interaksi antara radius *sprue* dan *holding time*.

Lebih jauh lagi diperoleh hasil bahwa pengaturan optimal untuk faktor-faktor tersebut adalah temperatur tuang 475°C, radius *sprue* 29.6 mm dan *holding time* 8 detik yang menghasilkan ketebalan sebesar 2.54 mm.

Dengan hasil ini maka tampak bahwa modifikasi *sprue* pada proses pengecoran saluran teko ini akan dapat memberikan hasil yang lebih optimal, yaitu ketebalan hasil cor yang paling tipis sehingga dapat mengurangi penggunaan material.

Daftar Pustaka

1. Banks, Jerry. *Principles of Quality control*, New York : John Wiley and Sons, 1989.
2. DeGarmo, E Paul. Black, J T. and Kosher, Ronald A. *Material and Processes in Manufacturing, 8th ed.* Singapore: Prentice-hall International Inc, 1997.
3. Montgomery, Douglas C. *Design and Analysis of Experiment, 4th ed.* New York: John Wiley and Sons, 1997.
4. Montgomery, Douglas C. *Introduction to Statistical Quality Control, 3th ed.* New York : John Wiley and Sons, 1997.
5. Rao, P N. *Manufacturing Technology*, New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1987.
6. Belavendram, Nicolo. *Quality by Design*, Prentice Hall International, 1995.
7. Arora, Jasbir S. *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill International Editions, 1989.
8. Vanderplaats, Garret N. *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: With Applications*, McGraw-Hill, 1984.