

## Aplikasi Rekayasa Mutu untuk Mengurangi Cacat pada Mesin *Injection Molding*

**Didik Wahjudi, Roche Alimin**

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

**Glenn Eko Yulianto**

Alumnus Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

### Abstrak

Pembuatan produk tutup gelas dengan proses *injection molding* di P.T. XYZ menghasilkan cacat yang cukup besar. Hal ini disebabkan belum adanya standarisasi proses (dalam *setting* mesin operator masih menggunakan cara coba-coba). Untuk mengetahui hubungan antara bagian yang tidak sempurna dengan variabel-variabel proses, seperti tekanan injeksi, putaran *screw*, dan temperatur *nozzle*, perlu dikembangkan model empirik yang menggambarkan hubungan antara bagian yang tidak sempurna dengan variabel-variabel dalam proses tersebut. Model empirik ini kemudian digunakan untuk meminimalkan bagian yang tidak sempurna.

Untuk menentukan model empirik dan meminimalkan bagian yang tidak sempurna dilakukan penelitian dengan menggunakan metode *Response Surface*. Rancangan percobaan menggunakan *Central Composite Design* (CCD). Tekanan injeksi bervariasi dari 35 MPa sampai 55 MPa, putaran *screw* bervariasi dari 40 rpm sampai 60 rpm dan temperatur *nozzle* bervariasi dari 140 °C sampai 160 °C.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *response surface* relevan digunakan untuk menentukan variabel proses yang memberikan kondisi minimum bagian yang tidak sempurna yang terjadi pada proses *injection molding*. Bagian yang tidak sempurna minimum sebesar 3,7 % terjadi pada tekanan injeksi 44 MPa, putaran *screw* 46 rpm dan temperatur *nozzle* 153 °C.

Kata kunci : metode permukaan respon, rekayasa mutu.

### Abstract

*The manufacturing of glass cover by injection molding process in P.T. XYZ created defective products. This happened because they did not have a standard procedure (in setting up the machine, the operator did not follow a standard procedure). In order to know the relationship between the percentage of the defective products and the process variables, such as injection pressure, screw speed, and nozzle temperature, we need to develop an empirical model that describes that particular relationship. This empirical model is then used to get the minimum defect percentage.*

*This research is held in order to determine empirical model and minimize defect percentage using Response Surface Method. The Experimental Design is Central Composite Design. Injection Pressure varies from 35 MPa to 55 MPa, Screw Speed varies from 40 rpm to 60 rpm, and Nozzle Temperature varies from 140°C to 160°C.*

*The research result shows that the response surface method is applicable to determine the minimum condition of defect percentage in injection molding process. The minimum defect percentage 3.7 % occurs at Injection Pressure of 44 MPa, Screw Speed of 46 rpm, and Nozzle Temperature of 153°C.*

Keywords : *response surface method, quality engineering*

---

**Catatan :** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Januari 2000. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 2 Nomor 1 April 2000.

## 1. Pendahuluan

Bagian yang tidak sempurna dari suatu produk dipengaruhi oleh banyak faktor sehingga sulit untuk menentukan besar masing-masing faktor tersebut. Untuk meminimalkan bagian yang tidak sempurna, perlu ditentukan suatu persamaan yang menunjukkan hubungan antara bagian yang tidak sempurna dengan variabel-variabel proses seperti tekanan injeksi, putaran *screw* dan temperatur *nozzle*. Karena belum ada penelitian sebelumnya dan bentuk model empirik yang menggambarkan hubungan antara bagian yang tidak sempurna dengan variabel-variabel dalam proses ini belum diketahui, maka permasalahan yang timbul adalah bagaimana menentukan model empirik tersebut agar dapat diketahui kondisi proses yang optimum.

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- Menganalisis pengaruh 3 faktor yaitu tekanan injeksi, putaran *screw* dan temperatur *nozzle*, terhadap bagian produk yang tidak sempurna dengan menggunakan metode *respon surface*.
- Menentukan model persamaan sebagai fungsi dari 3 faktor tersebut agar diperoleh tekanan, putaran *screw* dan temperatur *nozzle* yang optimal terhadap jumlah cacat minimal.

Manfaat dari penelitian ini adalah:

- Memperoleh model persamaan yang menunjukkan pengaruh kombinasi dari tekanan injeksi, putaran *screw* dan temperatur *nozzle* terhadap cacat produk.
- Memperoleh harga tekanan injeksi, putaran *screw*, dan temperatur *nozzle* yang optimal dalam memperkecil jumlah cacat.

Batasan dari penelitian ini adalah:

- Percobaan dilakukan pada range operasi yang biasa dipakai.
- Bentuk benda kerja tertentu.
- *Setting* mesin *injection moulding* dibuat tetap kecuali tekanan injeksi, putaran *screw*, dan temperatur *nozzle*.
- Bahan baku yang digunakan polyethylene.
- Dimensi dan kekuatan mould sudah memenuhi syarat.

## 2. Teori Dasar

### 2.1. Regresi Logistik

Pendekatan regresi logistik digunakan bila variabel responnya bersifat kualitatif. Apabila

variabel responnya bersifat biner, yaitu kemungkinan terjadinya hanya dua dan dapat dikategorikan 0 dan 1, maka pendekatan model regresinya adalah sebagai berikut:

$$p_i = \frac{1}{1 + e^{-[\mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1x_{1i} + \dots + \mathbf{b}_kx_{ki}]}} \quad (1)$$

dimana:  $p_i$  adalah probabilitas ( $Y_i = 1$ )

Untuk estimasi koefisien regresi model di atas, maka dilakukan transformasi Ln sehingga persamaan (2.1) menjadi linier.

$$\text{Ln} \frac{p_i}{(1 - p_i)} = \beta_0 + \beta_1x_{1i} + \beta_2x_{2i} + \dots + \beta_kx_{ki} \quad (2)$$

Bila pengamatan  $p_i$  pada setiap  $m$  kombinasi  $x_i$  diulang sebanyak  $n_i$  maka digunakan:

$$\bar{p}_i = \frac{r_i}{n_i} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

sehingga model (2.2) menjadi:

$$\text{Ln} \frac{\bar{p}_i}{(1 - \bar{p}_i)} = \beta_0 + \beta_1x_{1i} + \beta_2x_{2i} + \dots + \beta_kx_{ki} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, m$

Model (2.4) yang telah ditransformasi mempunyai *varians error*:

$$\text{Var}(\varepsilon_i) \cong \frac{1}{n_i p_i (1 - p_i) \dots} \quad (5)$$

Untuk model regresi seperti pada persamaan (2.4), yaitu pada regresi dengan respon biner pembobotnya ditaksir sebagai berikut:

$$w_i = \frac{1}{\hat{S}_{ei}^2} \dots \quad (6)$$

Dari *varians error* pada (2.5) maka diperoleh persamaan pembobot diatas menjadi:

$$w_i = n_i \bar{p}_i (1 - \bar{p}_i) \quad (7)$$

Bila *varians error* pada (2.5) dinotasikan dengan  $V\mathbf{S}^2$  maka nilai *Sum Square Error* adalah:

$$SS_{\text{Res(weighted)}} = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i) \dots \quad (8)$$

atau ditulis dalam notasi matrik:

$$SS_{\text{Res,V}} = (\mathbf{y} - \mathbf{x}_b)' \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{x}_b) \dots \quad (9)$$

Dan nilai taksiran untuk  $\beta$  ( $\mathbf{b}$ ) yang meminimumkan (2.9) adalah:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{y} \dots \quad (10)$$

sedemikian hingga  $E(\mathbf{b}) = \beta$ ,  $E(s^2) = V\mathbf{S}^2$ ,  $\text{Var}(\mathbf{b}) = (\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}$

*Standart error estimation* dapat dihitung sebagai berikut:

$\mathbf{S}^2_{\beta_i} = \sqrt{C_{ii}}$ , dimana  $c_{ii}$  adalah elemen diagonal ke-1 dari matrik *varians*  $\mathbf{S}(\mathbf{b}) = (\mathbf{X}'\mathbf{V}^{-1}\mathbf{X})^{-1}$

## 1.2. Karakteristik *Response Surface*

Karakteristik *response surface* digunakan untuk menentukan jenis titik stasioner, apakah maksimum, minimum atau titik pelana (*saddle*). Untuk mempermudah pendeteksiannya maka digambarkan kontur dari *response surface*-nya. Namun bila variabel bebasnya lebih dari dua maka interpretasinya menjadi sulit, sehingga digunakan metode analisis kanonik, yaitu dengan mentransformasikan fungsi respon dari titik asal  $X(0,0,\dots,0)$  ke titik stasioner  $X_0$  dan sekaligus merotasikan sumbu koordinatnya, sehingga dihasilkan fungsi respon sebagai berikut:

$$\hat{Y} = \hat{Y}_0 + \lambda_1 W_1^2 + \lambda_2 W_2^2 + \lambda_3 W_3^2 \quad (11)$$

dimana:

$W_i$  = variabel bebas baru hasil transformasi

$\hat{Y}_0$  = harga taksiran  $Y$  pada titik stasioner  $X_0$

$\lambda_i$  = konstanta yang merupakan *eigen value* dari matrik  $\mathbf{B}$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$

Sedangkan karakteristik dari *response surface* ditentukan dari harga  $\lambda_i$ . Jika nilainya semua positif maka  $X_0$  adalah titik minimum, sedangkan jika semua negatif maka  $X_0$  adalah titik maksimum, tetapi jika harganya berbeda tanda diantara harga  $\lambda_i$ , maka  $X_0$  merupakan titik pelana. Besarnya nilai  $\lambda_i$  menunjukkan tingkat sensitifitas dari respon untuk mengalami perubahan pada sumbu  $W_i$ . Hubungan antara variabel  $W$  dan  $X$  adalah:

$$\mathbf{W} = \mathbf{M}' (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \dots$$

dimana  $\mathbf{M}$  adalah matrik ortogonal yang berukuran  $k \times k$ .

## 3. Rancangan Percobaan

Metode yang digunakan adalah metode *response surface*. Dengan demikian maka kombinasi tekanan injeksi, putaran *screw* dan temperatur sebagai variabel bebas yang terlibat harus dirancang sesuai dengan disain percobaan untuk metode *response surface*, sehingga didapatkan data dari bagian yang tidak sempurna sebagai variabel respon yang akan diamati.

### 3.1. Material Produk

Material yang digunakan untuk memproduksi tutup gelas adalah *Low Density Polyethylene* dan *High Density Polyethylene* serta pewarna *Master Bath*, dengan komposisi campuran secara berturut-turut 30%-60%-10%.

### 3.2. Mesin Perkakas

Mesin *injection moulding* yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

- Merk / Type	: Super Master/SM-150
- Diameter Screw	: 46 mm
- Screw Spindle	: 0-100 rpm
- Clamping Force	: 150 MPa
- Injection Pressure	: 90 MPa
- Power Unit	: 25 HP

### 3.3. Penentuan Harga Variabel Proses Injection Moulding

Variabel-variabel proses yang diteliti adalah variabel yang berkaitan dengan *setting* mesin dan diduga berpengaruh terhadap cacat produk. Variabel-variabel tersebut adalah:

1. Variabel Respon : (bagian yang tidak sempurna)

Produk tutup gelas ini didefinisikan cacat bila produk sobek (material tidak memenuhi seluruh cetakan) dan *Flash* (material melebihi cetakan).

2. Variabel Prediktor :

- *Injection pressure*, dinotasikan  $X_1$  dengan range antara 35 MPa sampai dengan 55 MPa.
- Kecepatan putaran *screw*, dinotasikan  $X_2$  dengan range antara 40 rpm sampai + 0,128 $X_2$  -
- Temperatur *nozzle*, dinotasikan  $X_3$  dengan range antara 140°C sampai dengan 160°C.

### 3.4. Pengambilan Data

Data-data diperoleh dengan melakukan percobaan-percobaan terhadap variabel-variabel proses dengan rancangan faktorial ditambah beberapa *center point* untuk percobaan orde pertama dan *central composite design* untuk rancangan percobaan orde kedua. Untuk rancangan percobaan orde pertama jumlah pengamatan  $N = 2^3 + 4$  (*center point*), sehingga total pengamatannya 12, dan dilakukan replikasi sehingga jumlah pengamatan keseluruhannya adalah 24 pengamatan. Sedangkan untuk rancangan percobaan orde kedua terdiri dari faktorial  $2^3$  ditambah 6 *center point* dan 6 *axial point*, sehingga total pengamatannya adalah 20, dan dilakukan replikasi sehingga pengamatan keseluruhannya 40 pengamatan, dengan nilai  $\alpha = 1,68$ .

Dalam penelitian ini, level-level dari percobaan ditentukan berdasarkan literatur penggunaan mesin dan pengalaman

operasional. Level-level percobaan, baik untuk orde pertama maupun orde kedua dikodekan sedemikian hingga level rendah berhubungan dengan 1 dan level tinggi dengan 1 untuk mempermudah perhitungan.

Hubungan antara kode level dan nilai level variabel prediktor dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 1. Hubungan antara Kode Level dan Nilai Level**

Kode	-1,68	-1	0	1	1,68
X <sub>1</sub>	28,2	35	45	55	61,8
X <sub>2</sub>	33,2	40	50	60	68,8
X <sub>3</sub>	133,2	140	150	160	1688

Variabel respon yaitu bagian yang tidak sempurna diukur pada setiap kombinasi tekanan injeksi, putaran screw dan temperatur nozzle, atau setiap set-up mesin dengan cara menghitung bagian yang tidak sempurna yang terjadi pada 100 buah produk. Pengambilan sampel ini dilakukan setelah proses cukup stabil dan urutan kombinasi kondisi proses (percobaan) diacak untuk menghindari ketergantungan antar pengamatan.

### 3.5. Langkah-langkah Percobaan

Secara keseluruhan langkah-langkah percobaannya sebagai berikut:

1. Butiran plastik dan pewarna dicampur dalam mesin mixer kurang lebih 15 menit.
2. Memasukkan material plastik ke dalam hopper.
3. Melakukan set-up mesin yaitu dengan mengatur tombol-tombol injection pressure, putaran screw dan temperatur nozzle pada level-level rancangan percobaan, kemudian menekan tombol start yang berarti proses mulai berjalan.
4. Menunggu proses stabil.
5. Setelah proses stabil dilakukan pengambilan sampel sebanyak 100 buah produk.
6. Menghitung jumlah produk yang tidak sempurna (dalam %).
7. Mengulang langkah 1 sampai dengan 6 untuk kombinasi proses yang lain sampai rancangan percobaan selesai dilakukan seluruhnya.

### 3.6. Data Hasil Percobaan

Dari percobaan yang dilakukan didapat data sebagai berikut:

**Tabel 2. Data Percobaan Orde Pertama**

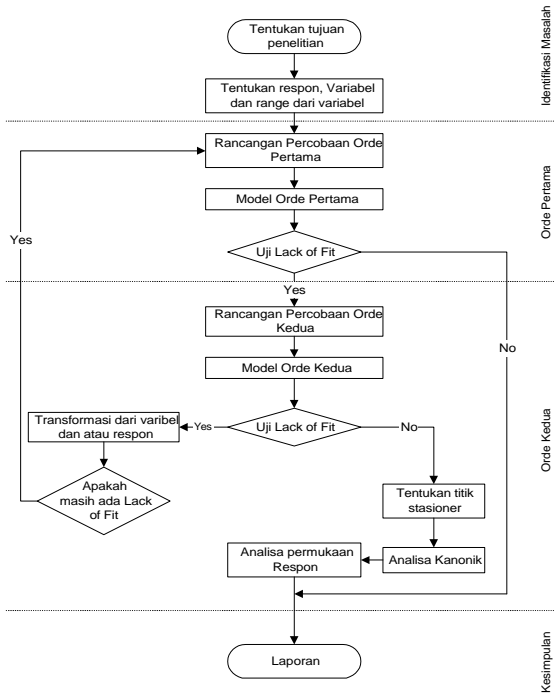
No	X1 (MPa)	X2 (MPa)	X3 (MPa)	Bagian yang tidak sempurna
1	55	60	160	0,72
2	55	60	140	0,20
3	55	40	160	0,08
4	35	60	160	0,28
5	55	40	140	0,55
6	35	60	140	0,40
7	35	40	160	0,08
8	35	40	140	0,70
9	45	50	150	0,03
10	45	50	150	0,05
11	45	50	150	0,03
12	45	50	150	0,07
13	55	60	160	0,73
14	55	60	140	0,19
15	55	40	160	0,10
16	35	60	160	0,21
17	55	40	140	0,45
18	35	60	140	0,37
19	35	40	160	0,09
20	35	40	140	0,72
21	45	50	150	0,03
22	45	50	150	0,04
23	45	50	150	0,07
24	45	50	150	0,03

**Tabel 3. Data Percobaan Orde Kedua**

No	X1 (MPa)	X2 (MPa)	X3 (MPa)	Bagian yang tidak sempurna
1	55	60	160	0,73
2	55	60	140	0,20
3	55	40	160	0,10
4	35	60	160	0,17
5	55	40	140	0,47
6	35	60	140	0,15
7	35	40	160	0,09
8	35	40	140	0,57
9	62	50	150	0,46
10	28	50	150	0,37
11	45	69	150	0,17
12	45	33	150	0,08
13	45	50	169	0,27
14	45	50	133	0,36
15	45	50	150	0,03
16	45	50	150	0,03
17	45	50	150	0,04
18	45	50	150	0,03
19	45	50	150	0,02
20	45	50	150	0,05
21	55	60	160	0,72
22	55	60	140	0,20
23	55	40	160	0,16
24	35	60	160	0,15
25	55	40	140	0,23
26	35	60	140	0,24
27	35	40	160	0,08
28	35	40	140	0,70
29	62	50	150	0,57
30	28	50	150	0,32
31	45	69	150	0,18
32	45	33	150	0,10
33	45	50	169	0,26
34	45	50	133	0,34
35	45	50	150	0,05
36	45	50	150	0,03
37	45	50	150	0,03
38	45	50	150	0,04
39	45	50	150	0,02
40	45	50	150	0,03

### 4. Pengolahan Data

Metode *Response Surface* pada prinsipnya meliputi Analisa Regresi dan Rancangan Percobaan Statistik untuk menyelesaikan masalah optimasi. Adapun langkah-langkah analisa pengolahan data dengan metode *Response Surface* dapat dilihat pada bagan alir di bawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Analisa Pengolahan Data dengan *Response Surface Methode*

### 5. Analisa Data dan Pembahasan

Data hasil percobaan baik untuk percobaan orde pertama maupun orde kedua dapat dilihat pada sub. 3.6. Pengolahan data dibantu dengan *software* Minitab.

#### 5.1. Analisis Model Orde Pertama

Dari hasil pengolahan data dengan *software* Minitab diperoleh model orde pertama sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \epsilon$$

Hasil perhitungan data ditampilkan pada tabel parameter regresi berikut ini:

Tabel 4. Koefisien Regresi Orde Pertama

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	-0,7379	0,2956	-2,50	0,021
X1	0,0794	0,3035	0,26	0,796
X2	0,0515	0,3138	0,16	0,871
X3	-0,3453	0,3180	-1,09	0,290

Sehingga diperoleh persamaan orde pertama:

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = -0,738 + 0,079X_1 + 0,051X_2 - 0,345X_3$$

dimana : p = bagian yang tidak sempurna  
 X1 = tekanan injeksi  
 X2 = putaran screw  
 X3 = temperatur nozzle

Bila dikembalikan ke bentuk semula:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-[-0,738 + 0,079X_1 + 0,051X_2 - 0,345X_3]}}$$

Hasil perhitungan pengujian model orde pertama secara serentak ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 5. Anova Model Orde Pertama

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	31,19	10,40	0,41	0,747
Error	20	506,97	25,35		
Total	23	538,16			

Dari uji *lack of fit* model orde pertama diperoleh  $p_{value} = 0$  atau kurang dari 0,05 (tingkat  $\alpha$  yang diinginkan) sehingga dapat diambil keputusan untuk menolak  $H_0$  yang berarti ada *lack of fit* atau ketidak sesuaian model.

Kesimpulan ini didukung oleh uji parameter regresi secara serentak seperti yang terlihat pada tabel 5 diatas yang menunjukkan  $p_{value}$  dari regresi lebih dari 0,05 yang berarti variabel  $X_i$  tidak mewakili model atau terima  $H_0$  yang berarti semua variabel bebas  $X_i$  tidak berpengaruh terhadap respon secara linear, sedangkan uji parameter regresi secara individu juga menunjukkan bahwa  $p_{value}$  masing-masing variabel  $X_i$  lebih besar dari 0,05 yang berarti terima  $H_0$  atau masing-masing variabel  $X_i$  tidak mempunyai sumbangan yang berarti terhadap terjadinya perubahan pada respon. Karena model orde pertama tidak sesuai maka analisis dilanjutkan pada pendugaan model orde kedua.

#### 5.2. Analisis Model Orde Kedua

Data yang didapat dari rancangan percobaan orde kedua, dilakukan perhitungan dan analisa untuk menentukan koefisien-koefisien pemodelan orde kedua dari persamaan:

$$Y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_{11}X_1^2 + \beta_{22}X_2^2 + \beta_{33}X_3^2 + \beta_{12}X_1X_2 + \beta_{13}X_1X_3 + \beta_{23}X_2X_3$$

Hasil perhitungan data ditunjukkan pada tabel berikut ini

**Tabel 6. Koefisien Regresi Orde Kedua**

Predictor	Coef	Stdev	t-ratio	p
Constant	-3,31030	0,21500	-15,40	0,000
X <sub>1</sub>	0,24348	0,04651	5,23	0,000
X <sub>2</sub>	0,12797	0,06035	2,12	0,042
X <sub>3</sub>	-0,19634	0,05212	-3,77	0,001
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	0,35369	0,07415	4,77	0,000
X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub>	0,51203	0,07460	6,86	0,000
X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub>	0,81792	0,07296	11,21	0,000
X <sub>1</sub> *X <sub>1</sub>	1,06502	0,08279	12,86	0,000
X <sub>2</sub> *X <sub>2</sub>	0,48600	0,09037	5,38	0,000
X <sub>3</sub> *X <sub>3</sub>	0,86681	0,08469	10,24	0,000

Sehingga didapatkan persamaan:

$$\hat{Y} = -3.31 + 0,243X_1 + 0,128X_2 - 0,196X_3 + 0,354X_1X_2 + 0,512X_1X_3 + 0,818X_2X_3 + 1,07X_1^2 + 0,486X_2^2 + 0,86X_3^2$$

dimana :

$$\hat{Y} = \text{nilai taksiran untuk } \left( \frac{p}{1-p} \right)$$

X<sub>1</sub> = nilai kode variabel tekanan injeksi

X<sub>2</sub> = nilai kode variabel putaran screw

X<sub>3</sub> = nilai kode variabel temperatur nozzle

Dalam bentuk regresi logistik model yang diperoleh diatas dapat ditulis sebagai berikut:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-1-3,31+0,243X_1+0,128X_2-0,196X_3+0,354X_1X_2+0,512X_1X_3+0,818X_2X_3+1,07X_1^2+0,486X_2^2+0,86X_3^2}}$$

Dari uji lack of fit model orde kedua diperoleh p<sub>value</sub> = 0,2232 atau > α = 0,05 sehingga tidak ada alasan untuk menolak H<sub>0</sub> yang berarti tidak ada lack of fit atau model orde kedua sesuai dengan model yang diduga.

Pengujian parameter regresi secara serentak menggunakan hipotesa sebagai berikut:

$$H_0 = \beta_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

H<sub>1</sub> = Paling tidak ada satu β<sub>i</sub> yang tidak sama dengan nol.

Untuk pengambilan keputusan pengujian ini digunakan tabel Anova sebagai berikut:

**Tabel 7. Tabel Anova Model Orde Kedua**

Source	DF	SS	MS	F	p
Regression	9	1132,50	125,83	67,14	0
Error	30	56,22	1,87		
Total	39	1188,73			

Dari tabel Anova diatas terlihat F<sub>rasio</sub> = 67,14 > F<sub>tabel</sub> = F(9;30;0,05) = 2,21 atau P<sub>value</sub> < (α=0,05) maka diambil keputusan untuk menolak H<sub>0</sub> yang berarti variabel-variabel bebas X<sub>i</sub> memberikan sumbangan yang berarti dalam model. Untuk pengujian parameter regresi secara parsial dengan hipotesa sebagai berikut:

$$H_0 = \beta_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

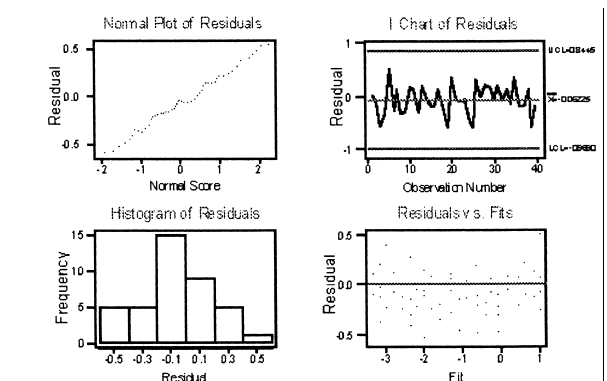
$$H_1 = \beta_i \neq 0$$

Dari tabel 6 diatas dapat dilihat bahwa P<sub>value</sub> masing-masing variabel < dari 0,05 yang berarti semua variabel bebas mewakili model atau memberikan sumbangan yang cukup berarti dalam model.

Berdasarkan pengujian-pengujian diatas maka dapat diambil kesimpulan bahwa model telah sesuai dengan model yang diduga sehingga model ini layak untuk digunakan dalam analisa lebih lanjut.

### 5.3. Pengujian Asumsi Residual

Dari model orde kedua yang telah diperoleh, analisa selanjutnya adalah menguji residual apakah residual telah mengikufi asumsi ε<sub>i</sub> ≈ IIDN (0, σ<sup>2</sup>)

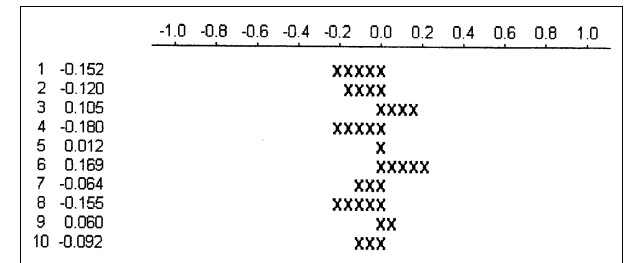


**Gambar 2. Plot Pemeriksaan Residual**

#### 5.3.1. Independen

Residual akan independen bila nilai ACF nya berada pada interval  $\frac{2}{\sqrt{n}}$ . Untuk model orde

kedua diatas, dengan n = 40 residual telah memenuhi asumsi independen karena nilai ACF-nya terletak pada interval ± 0,316, seperti terlihat pada Plot ACF gambar 3.



**Gambar 3. Plot ACF**

#### 5.3.2. Identik

Pada Plot Pemeriksaan Residual tampak bahwa plot antara fit dan residual menyebar secara acak disekitar nol, ini menunjukkan bahwa varians residual homogen.

**5.3.3. Normal**

Pemeriksaan asumsi kenormalan dapat dilakukan dengan membuat plot normal. Bila hasil dari plot tersebut mendekati garis lurus, maka dapat dikatakan bahwa residual mengikuti distribusi normal (0, σ<sup>2</sup>). Sebagaimana terlihat pada gambar 2 (Normal Plot of Residual), plot mendekati garis lurus sehingga dapat dikatakan bahwa residual memenuhi asumsi kenormalan.

**5.4. Penentuan Titik Stasioner**

Dalam menentukan titik stasioner digunakan model yang sesuai yaitu model orde kedua. Dari model yang diduga diperoleh:

$$\text{Matrik } \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0,243 \\ 0,128 \\ -0,196 \end{bmatrix};$$

$$\text{Matrik } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1,07 & 0,177 & 0,256 \\ 0,177 & 0,486 & 0,409 \\ 0,256 & 0,409 & 0,867 \end{bmatrix}$$

Sehingga titik stasioner yang diperoleh adalah:

$$\mathbf{X}_0 = \frac{-\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}}{2} = \begin{bmatrix} -0,131438 \\ -0,350919 \\ 0,31786 \end{bmatrix}$$

Dengan nilai taksiran respon pada titik stasioner adalah:

$$\hat{Y} = \mathbf{b}_0 + \frac{\mathbf{X}_0^T \mathbf{b}}{2} = -3,2405$$

Nilai sebenarnya titik stasioner dari variabel-variabel proses adalah: X<sub>1</sub> = 44 MPa, X<sub>2</sub> = 46 rpm, dan X<sub>3</sub> = 153°C. Sedangkan nilai respon sebenarnya p = 0,037 = 3,7%.

**5.5. Analisis Karakteristik Permukaan Respon**

Untuk membantu analisa karakteristik permukaan respon, digunakan metode analisa Kanonik. Berdasarkan persamaan (2.11) dapat digambarkan *Surface* dan kontur dari model yang diperoleh. Adapun untuk membentuk persamaan tersebut harus dilakukan perhitungan nilai *eigen value* dari Matrix **B** berikut:

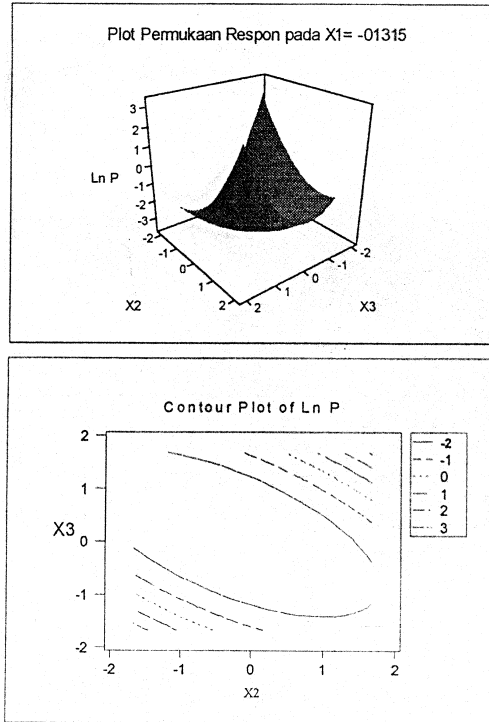
$$\text{Matrik } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1,07 & 0,177 & 0,256 \\ 0,177 & 0,486 & 0,409 \\ 0,256 & 0,409 & 0,867 \end{bmatrix}$$

Nilai *eigen value* matrik diatas adalah:

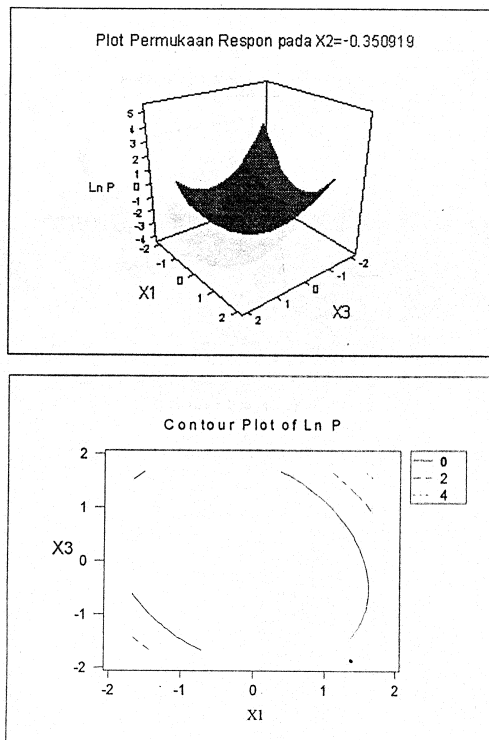
$$\lambda_i = [1,41124 \quad 0,78663 \quad 0,22513]$$

Karena *eigen value* ketiga-tiganya positif maka

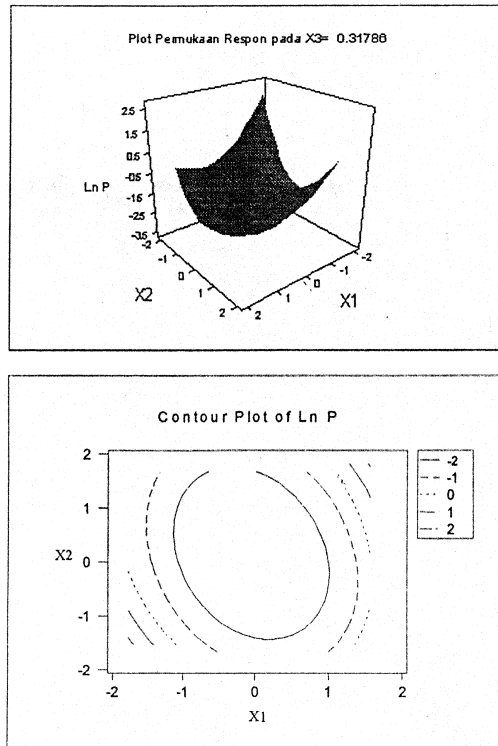
dapat diketahui bahwa bentuk permukaan respon adalah minimum. Dengan membuat konstan salah satu variabel pada titik stasioner dapat dilihat pada gambar 4, 5 dan 6 bahwa bentuk *surface* dan konturnya adalah minimum.



**Gambar 4. Plot Permukaan Respon dan Kontur pada X<sub>1</sub> = -0,1315**



**Gambar 5. Plot Permukaan Respon dan Kontur pada X<sub>2</sub> = -0,350919**



Gambar 6. Plot Permukaan Respon dan Kontur pada  $X_3 = 0,31786$

Penjelasan detail mengenai bentuk respon disekitar titik optimum digunakan bentuk kanonik. Dari *eigen values* diatas dapat dibentuk persamaan kanonik sebagai berikut:

$$\hat{Y} = \hat{Y}_0 + \lambda_1 W_1^2 + \lambda_2 W_2^2 + \lambda_3 W_3^2$$

$$\hat{Y} = -3.2405 + 1.41124 W_1^2 + 0.78663 W_2^2 + 0.22513 W_3^2$$

Hubungan antara variabel W dan variabel  $X_i$  adalah:

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,673719 & -0,738818 & -0,015808 \\ -0,738818 & 0,341975 & 0,84083 \\ 0,015808 & 0,84083 & -0,532817 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 - 0,131438 \\ X_2 - 0,350919 \\ X_3 + 0,31786 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh:

$$W_1 = -0,673719 X_1 - 0,738818 X_2 - 0,015808 X_3 + 0,342491$$

$$W_2 = -0,738818 X_1 + 0,341975 X_2 + 0,84083 X_3 + 0,24407$$

$$W_3 = -0,015808 X_1 + 0,84083 X_2 - 0,532817 X_3 - 0,462346$$

$W_i$  adalah *principal axes* dari sistem respon.

Dari ketiga nilai mutlak eigen dapat dilihat bahwa  $|\lambda_1| > |\lambda_2| > |\lambda_3|$ . Hal ini menunjukkan bahwa nilai respon sensitif untuk mengalami perubahan terbesar pada sumbu  $W_1$  atau untuk  $W_1$  permukaan respon sensitif berubah bentuknya, sedangkan untuk perubahan pada

sumbu  $W_2$ , sensitifitas respon lebih kecil daripada perubahan pada sumbu  $W_1$ , sedangkan perubahan sumbu  $W_3$  memberikan sensitifitas respon terkecil.

## 5.6. Pembahasan

Dari analisa data diperoleh model regresi untuk bagian yang tidak sempurna sebagai berikut :

$$\hat{Y} = -3,31 + 0,243 X_1 + 0,128 X_2 - 0,196 X_3 + 0,354 X_1 X_2 + 0,512 X_1 X_3 + 0,818 X_1 X_1 + 1,07 X_1^2 + 0,486 X_2^2 + 0,86 X_3^2$$

Melalui analisis kanonik diketahui bahwa persamaan diatas merupakan fungsi minimum, dengan respon minimum adalah 0,037 yang dihasilkan oleh variabel proses pada

$$X_1 = 44 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 46 \text{ rpm}$$

$$X_3 = 153 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pengaruh dari ketiga variabel ini saling berkaitan. Tiga buah kondisi yang dapat mewakili kombinasi variabel yang lainnya dipilih yaitu:

1. Tekanan injeksi (1), putaran screw (1), dan temperatur nozzle (1)

Material sebelum diinjeksikan kedalam cetakan akan memiliki viskositas yang rendah, karena adanya pemanasan internal yang disebabkan oleh gesekan antara material itu sendiri dan antara material, screw dan barrel serta pemanasan eksternal yang dibangkitkan oleh heater bands. Dengan demikian jika tekanan injeksi yang dipakai tinggi maka kecepatan aliran material yang menuju rongga cetak juga tinggi, sehingga material yang mempunyai viskositas rendah akan mengisi melebihi rongga cetak (flash).

2. Tekanan injeksi (0), putaran screw (0) dan temperatur nozzle (0)

Pada kondisi ini seluruh variabel berada pada taraf sedang dan menghasilkan cacat yang minimum. Ini terjadi karena tekanan injeksi yang sesuai dengan kondisi material (viskositas dari material tidak terlalu tinggi maupun terlalu rendah) yang akan diinjeksikan kedalam cetakan.

3. Tekanan injeksi (-1), putaran screw (-1) dan temperatur nozzle (-1)

Material yang akan diinjeksikan ke dalam cetakan akan mempunyai viskositas yang tinggi sehingga diperlukan tekanan yang lebih besar untuk mengisi rongga cetak. Pada kombinasi ini tekanan injeksi yang dipakai rendah, jika kecepatan aliran dari material plastik rendah maka pembekuan



pada dinding rongga cetak akan dengan cepat berlangsung, sehingga sebelum material plastik mengisi penuh rongga cetak aliran akan membeku dan terjadi produk yang tidak sempurna.

Jika ketiga kondisi ini diplotkan maka akan tampak suatu kurva yang mempunyai dua buah titik maksimum dan sebuah titik minimum (dapat dianalogkan sebagai kurva kuadrat). Sedangkan kombinasi variabel yang lain akan menyebar diantara tiga variabel tersebut.

Pembahasan untuk kombinasi variabel proses yang lainnya akan sangat berhubungan dengan ketiga kondisi diatas. Jika ada dua variabel dengan level 1 dan sebuah variabel dengan level -1 atau dua buah variabel dengan level -1 dan sebuah variabel 1, variabel-variabel tersebut akan saling mengeliminasi, sehingga jumlah bagian yang tidak sempurna yang terjadi untuk kombinasi variabel tersebut akan berada diantara ketiga kondisi diatas. Jadi interaksi antara ketiga variabel tersebut sangat signifikan.

Dari ketiga variabel proses ini, tekanan injeksi memberikan kontribusi yang paling besar untuk perubahan pada bagian yang tidak sempurna, karena tekanan injeksi adalah variabel yang berhubungan langsung pada pengisian rongga cetak, sedangkan variabel yang lain hanya mendukung proses penginjeksian, yaitu dengan mengkondisikan material yang akan diinjeksikan ke dalam rongga cetak tersebut. Sedangkan putaran *screw* memberikan kontribusi yang paling sedikit bagi perubahan pada bagian yang tidak sempurna. Pembangkitan panas yang diakibatkan oleh gesekan yang terjadi antara material itu sendiri maupun antara material dengan komponen dari mesin adalah tidak selalu signifikan. Pengaruh dari putaran *screw* yang paling besar adalah pada proses pengisian *shooting pot* (semakin tinggi putaran *screw*, pengisian semakin cepat) tetapi karena waktu pendinginan yang besar maka terdapat *idle time* diantara langkah *plastising* dengan penginjeksian, sehingga pengisian *shooting pot* tersebut tidak berpengaruh terhadap terjadinya cacat maupun waktu siklus pembuatan produk tersebut.

## 6. Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan analisis optimasi pada proses *injection moulding*, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

Pengaruh variabel-variabel proses terhadap bagian yang tidak sempurna secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-3.31 + 0.243x_1 + 0.128x_2 - 0.196x_3 + 0.354x_1x_2 + 0.512x_1x_3 + 0.818x_2x_3 + 1.07x_1^2 + 0.486x_2^2 + 0.867x_3^2]}$$

dimana P = bagian yang tidak sempurna  
 $X_1$  = tekanan injeksi  
 $X_2$  = putaran *screw*  
 $X_3$  = temperatur *nozzle*

Kondisi optimum untuk respon bagian yang tidak sempurna diperoleh pada kondisi proses Tekanan injeksi 44 Mpa, putaran *screw* 46 rpm dan temperatur *nozzle* 153 °C dengan respon minimum sebesar 3.7%.

## Daftar Pustaka

1. Walter, M., Gerd, P., *Injection Moulding an Introduction*, Hanser Publisher, New York, 1995.
2. Vincent, G., *Teknik Analisa dalam Penelitian Percobaan*, jilid 2, Tarsito, Bandung, 1991.
3. Myers, R. H., *Response Surface Methodology*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1976.
4. Draper, N. R., Smith, H., *Applied Regression Analysis, Second Edition*, John Willey and Sons Inc., New York, 1980.
5. Myers, R. H., *Classical and Modern Regression With Application*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1986.
6. Box, George E.P., Hunter, W.G., and Hunter, S. J., *Statistics For Experiments*, John Willey and Sons Inc., New York, 1978.
7. Baird, R. J., David T., *Industrial Plastics*, The Goodheart Willcox Company Inc., South Holland, Illinois, 1982.
8. Khuri, A., Comell, J. A., *Response Surfaces Design and Analysis*, Department of Statistic, University of Florida, Gainesville, Florida, 1987.