

# Optimasi Kekerasan Kampas Rem Dengan Metode Desain Eksperimen

**Didik Wahjudi  
Amelia**

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

**Tomy Suhartojo**

Alumni Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin - Universitas Kristen Petra

## Abstrak

Kampas rem selalu dibutuhkan didalam dunia otomotif, sehingga kualitas yang baik dari hasil produksi perlu didapatkan. Kualitas kampas rem harus memenuhi standar, salah satunya tergantung dari kekerasannya. Kekerasan kampas rem berkaitan dengan umur kampas rem, umur drum atau piringan serta jenis kendaraan. Untuk mendapatkan hasil produksi optimal, maka akan dilakukan eksperimen dari faktor-faktor yang mempengaruhi nilai kekerasan kampas rem dan menentukan *level* dari faktor-faktor tersebut.

Kata kunci: desain eksperimen, kampas rem.

## Abstract

*Brake lining always needed in automotive world, so good quality from process manufacturing must be obtained. Brake lining quality must be fulfilled, one of the properties is hardness. Brake lining hardness correlate with influence their lifetime, the drum or disk lifetime and type of vehicle. To get optimal performance of production, we make experiment from factors that influence the hardness of brake lining and determine level from their factors.*

*Keywords: design experiment, brake lining.*

## Daftar Notasi

DF	derajat kebebasan
F	F-ratio
MS	variansi akibat perubahan level suatu sumber variansi
P	P-value = nilai $\alpha$ kritis
R <sup>2</sup>	koefisien determinasi
S	standar deviasi
SS	jumlah dari kuadrat
T	T-ratio
X	variabel bebas terkontrol atau faktor terkontrol
Y	variabel respon
Z	variabel bebas tidak terkontrol atau faktor tidak terkontrol
$\alpha$	kesalahan alpha
$\rho$	persentase kontribusi
...e	error

## 1. Pendahuluan

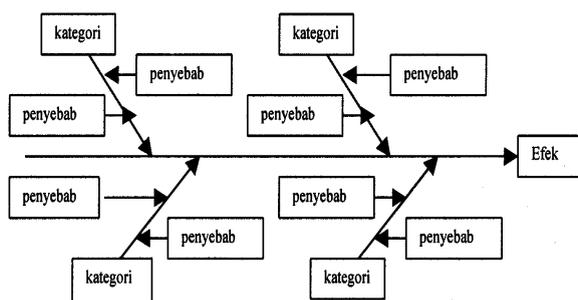
Optimasi sifat dari suatu produk dapat dilakukan dengan berbagai cara. Cara paling sederhana yaitu dengan diagram sebab akibat dimana cara ini perlu dianalisa lebih lanjut untuk mendapatkan hasil yang akurat. Pada umumnya diagram sebab akibat digunakan untuk menyelidiki penyebab dari suatu akibat yang mempengaruhi hasil produksi, sehingga dapat dikategorikan adanya faktor terkontrol dan faktor tidak terkontrol yang akan digunakan untuk melakukan desain eksperimen.

Pada desain eksperimen, selalu dilakukan analisa. Analisa biasanya dengan menggunakan ANOVA sehingga dapat diketahui faktor-faktor signifikan dalam eksperimen. Desain faktorial merupakan solusi paling efisien pada eksperimen yang menggunakan pengaruh dari dua atau lebih faktor. Namun ada pula metode *Response Surface* yang dapat digunakan untuk membuat model dan menganalisa suatu respon yang dipengaruhi oleh beberapa faktor untuk mengoptimalkan respon tersebut.

**Catatan** : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2002. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 4 Nomor 2 Oktober 2002.

## 2. Diagram Sebab Akibat

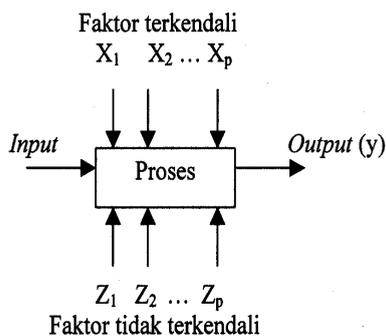
Diagram ini banyak dipakai untuk menentukan hubungan sebab dan akibat suatu proses. Sebab yang merupakan faktor terkontrol dapat digunakan untuk menentukan faktor terkendali pada desain eksperimen. Diagram sebab akibat dapat digunakan untuk (i) mengeliminasi kondisi yang menyebabkan kesalahan produksi, (ii) analisa secara aktual kondisi proses yang bertujuan memperbaiki kualitas, (iii) efisiensi sumber daya dan (iv) minimalisasi dana.



Gambar 1. Diagram Tulang Ikan

## 3. Desain Eksperimen dan ANOVA

Pada desain eksperimen, terdapat *input*, *proses* and *output*. Proses akan melakukan suatu rangkaian operasi terhadap faktor *input* untuk menghasilkan *output*  $y$  dimana *output* dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor terkontrol ( $X_1, X_2, \dots, X_p$ ) maupun faktor tak terkontrol ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ ). Desain eksperimen akan digunakan untuk (i) menentukan variabel yang paling berpengaruh terhadap respon  $y$ , (ii) pengaturan harga  $x$  yang berpengaruh sehingga  $y$  berada disekitar nilai nominal yang diinginkan, (iii) variabilitasnya kecil dan pengaruh faktor tidak terkontrol minimal. Manfaat yang dapat diperoleh dari desain eksperimen yaitu (i) dapat memperbaiki hasil proses, (ii) mengurangi biaya total produksi.



Gambar 2. Bentuk Umum Diagram Proses

Apakah suatu faktor memberi pengaruh signifikan terhadap respon, dilakukan uji verifikasi dengan  $F_{test}$  dan menghitung persentase kontribusi. Keterbatasan  $F_{test}$  : (i) nilai  $MS_e$  diasumsikan konstan untuk semua sumber variansi, (ii) adanya  $\alpha$  memungkinkan terjadinya  $\alpha$  error, (iii) pada teknik *polling up* terjadi pengurangan faktor untuk menyederhanakan desain eksperimen untuk mengatasi keterbatasan ini, dilakukan perhitungan persentase kontribusi  $\rho$ . Jika  $\rho_e \leq 15\%$ , diasumsikan tidak ada faktor yang terlewatkan, tapi bila  $\rho_e \geq 50\%$  ada beberapa faktor penting yang terlewatkan.

## 4. Desain Faktorial

Desain faktorial merupakan solusi paling efisien bila eksperimen meneliti pengaruh dari dua atau lebih faktor, karena semua kemungkinan kombinasi tiap *level* dari faktor-faktor dapat diselidiki secara lengkap. Kelebihan desain faktorial adalah (i) lebih efisien dibanding dengan metode *one-factor-at-a-time*, (ii) mampu menunjukkan efek interaksi antar faktor, (iii) dapat memberikan perkiraan efek dari suatu faktor pada kondisi *level* yang berbeda-beda dari suatu faktor lain. Pada desain faktorial, setidaknya harus dilakukan dua replikasi untuk menentukan  $SS_e$  jika kemungkinan semua interaksinya masuk dalam model perhitungan. Sedang untuk mengetahui variabilitas dari respon apakah benar-benar disebabkan oleh faktor dan interaksi yang dipilih dapat digunakan koefisien determinasi atau dengan analisa residual untuk melihat apakah model desain sudah sesuai.

## 5. Response Surface Methodology (RSM)

RSM merupakan metode gabungan antara teknik matematika dan statistik untuk membuat model dan menganalisa suatu respon  $y$  yang dipengaruhi oleh beberapa faktor  $x$  untuk mengoptimalkan respon tersebut.

## 6. Proses Pembuatan Kampas Rem

Kampas rem merupakan salah satu suku cadang yang cukup vital, karena itu diharapkan dapat memiliki kualitas maupun harga yang bersaing. Kualitas dipengaruhi oleh kekerasan kampas rem. Kampas rem yang terlalu keras menyebabkan umur drum atau cakram menjadi pendek sedang bila terlalu lunak maka umur kampas rem akan pendek.

Proses pembuatan kampas rem yang digunakan dengan cara *dry mix*. Urutan proses pembuatan dengan *dry mix* dilakukan dengan:

- a. proses penimbangan, dimana toleransinya sebesar 1% dari volume benda kerja.
- b. proses *mixing*, dilakukan selama 15 sampai 20 menit.
- c. proses *cool press* (penekanan dengan cara dingin), untuk membuat bentuk dasar kampas rem dan penekanan dilakukan dengan cara tekan hidrolis. Hasil yang diperoleh berupa kampas rem yang rapuh dan masih basah.
- d. proses *hot press* (penekanan dengan cara panas), kampas rem yang masih rapuh ditekan dan dikeraskan dengan disertai tekanan secara kontinu.
- e. proses *oven*, bertujuan untuk menyempurnakan penetrasi panas dan menyempurnakan persenyawaan antar material kampas rem. Suhu minimum yang harus diberikan adalah 105°C (untuk pelepasan gas) dan waktu minimumnya 2,5 jam (untuk mengubah ikatan polimer). Hasil yang diperoleh berupa kampas rem yang keras namun ulet.
- f. proses *finishing*, terdiri dari proses *slab*, *drilling*, *boring* dan *cutting*.

Bahan kampas rem yang diproduksi meliputi :

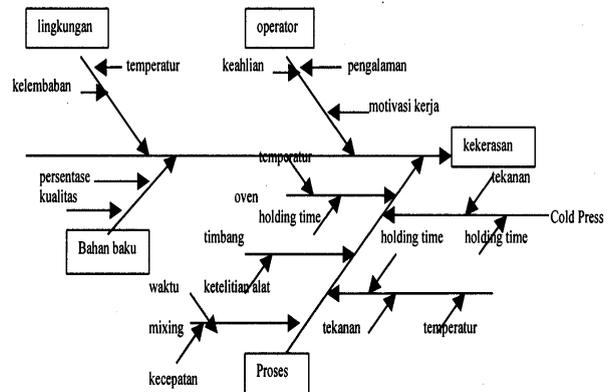
1. Asbes dengan jenis *chrysotile*, bahan ini mampu mempertahankan serat alamnya hingga 1400°C. Jika pemanasan dilakukan sampai 500°C maka kandungan airnya akan hilang dan asbes menjadi rapuh.
2. *Phenolic resin* sebagai bahan pengikat agar antar material akan menjadi satu dan mengisi rongga dalam kampas rem sehingga akan menjadikan kampas rem lebih padat.
3. *Elastomer* berupa karet sintesis digunakan sebagai bahan pengikat.
4. *Filler* berupa alumina dan barium sulfat digunakan untuk mengisi ruang yang kosong pada kampas rem, selain itu *filler* yang semakin keras akan mengakibatkan koefisien gesek semakin besar.
5. *Friction modifier* berupa grafit dan *friction dust*.
6. Serpihan logam berupa tembaga dan kuningan berfungsi sebagai isolator dan timah untuk mengurangi laju keausan dan suara berisik.

Untuk standarisasi kekerasan akan digunakan standarisasi uji kekerasan JIS yaitu JASO 405, 406 dan 407.

## 7. Prosedur Perancangan dan Percobaan

### A. Rancangan eksperimen

- a. menyusun diagram sebab akibat dengan memilih materi yang akan dianalisa, yaitu nilai kekerasan kampas rem.



Gambar 3. Diagram Sebab-Akibat untuk Optimasi Kekerasan Kampas Rem

- b. menganalisa masalah yang ada dan penyebab-penyebabnya.
  - bahan baku, meliputi persentase bahan baku dan kualitas bahan
  - operator, meliputi keahlian, pengalaman dan motivasi kerja
  - lingkungan, meliputi temperatur ruang dan kelembaban udara
  - proses, meliputi beberapa proses yaitu:
    - penimbangan, dipengaruhi oleh ketelitian alat
    - pencampuran bahan, dipengaruhi oleh lama proses dan kecepatan mesin
    - *cold press*, dipengaruhi oleh besar tekanan dan lama proses
    - *hot press*, dipengaruhi oleh besar tekanan, lama proses dan temperatur pemanasan
    - *oven*, dipengaruhi oleh temperatur kerja dan *holding time*.

Dari analisa diatas maka dari beberapa masalah yang ada ditentukan faktor terkendali dan faktor tidak terkendali yaitu :

- faktor terkendali: bahan baku, operator, proses.
  - faktor tidak terkendali : lingkungan.
- c. menyusun rancangan desain eksperimen
    - variabel respon: nilai kekerasan kampas rem yang akan diperoleh melalui uji kekerasan dengan metode uji kekerasan Rockwell B

- variabel bebas/faktor : penentuannya akan digunakan *fixed effect model*. Faktor-faktornya :
  - kadar resin, pemilihan dilakukan karena persentase kadar resin memberikan pengaruh besar terhadap kekerasan kampas rem, *level* yang dipilih adalah 3 *level* yaitu : 7%, 11% dan 15%.
  - temperatur oven, dipilih karena faktor biaya dan waktu, sehingga diharapkan dapat mencapai kondisi yang optimum, *level* yang dipilih juga 3 *level* yaitu : 115°C, 160°C dan 205°C.
  - *holding time*, pemilihan faktor ini mempunyai alasan sama dengan temperatur oven sehingga dicapai biaya dan waktu optimum dengan kekerasan optimum pula, *level* yang dipilih adalah 4 *level* yaitu : 4, 6, 8 dan 10 jam.

Karena jumlah *level* dari ketiga faktor tidak sama, maka desain eksperimen yang dipilih adalah desain faktorial dengan *level* campuran dan jumlah replikasi dipilih dua.

- d. menyusun kode *level* untuk masing-masing *level* dari tiap faktor, seperti pada tabel 1.

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

Faktor	Level			
	0	1	2	3
Kadar resin (%)	7	11	15	-
Temperatur oven (°C)	115	160	205	-
Holding time oven (jam)	4	6	8	10

- e. Membentuk grup spesimen dan pengacakan urutan grup pada proses oven.

**B. Percobaan**

- a. membagi kadar bahan baku kampas rem dengan kadar resin yang bervariasi.
- b. melakukan proses produksi lanjutan sampai proses *hot press* sesuai standar oleh operator yang sama.
- c. mengatur variasi kombinasi temperatur oven dan *holding time* untuk tiap spesimen dan melakukan proses oven.
- d. melakukan proses penghalusan permukaan kampas rem.
- e. melakukan pengujian kekerasan dengan tiga kali indentasi untuk tiap spesimen.

**8. Analisa Data dan Pembahasannya**

**A. Data hasil eksperimen**

**Tabel 2. Data Hasil Eksperimen**

Holding time (jam) C	Kadar Resin (%) A								
	7			11			15		
	Temperatur Oven (°C) B								
	115	160	205	115	160	205	115	160	205
4	27.70	25.67	34.00	23.97	23.67	25.80	72.07	75.57	70.60
	25.53	26.83	35.43	21.53	26.50	28.60	73.77	75.00	72.13
6	30.63	34.27	35.90	19.43	25.37	27.80	72.37	76.27	64.23
	29.90	32.87	34.47	21.50	24.77	27.30	73.80	78.70	67.53
8	26.10	28.10	29.57	24.30	25.07	25.30	59.60	80.90	72.67
	24.87	26.83	27.37	25.03	25.37	27.67	57.50	83.10	70.63
10	33.63	32.13	30.73	22.40	19.47	21.93	15.57	18.57	22.30
	35.83	33.97	31.47	23.57	11.27	22.07	16.93	18.73	19.50

**B. Perhitungan Anova untuk hasil analisa eksperimen pada data awal dengan menggunakan Minitab 11.12**

**Analysis of Variance (Balanced Designs)**

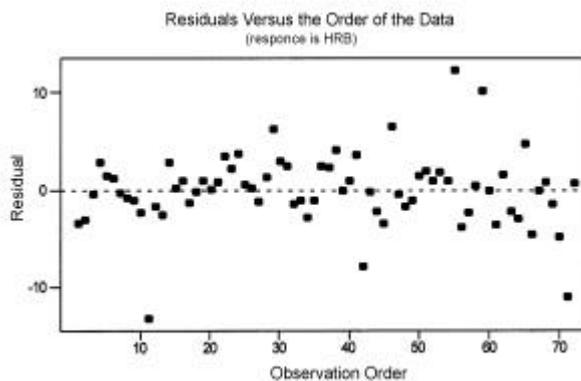
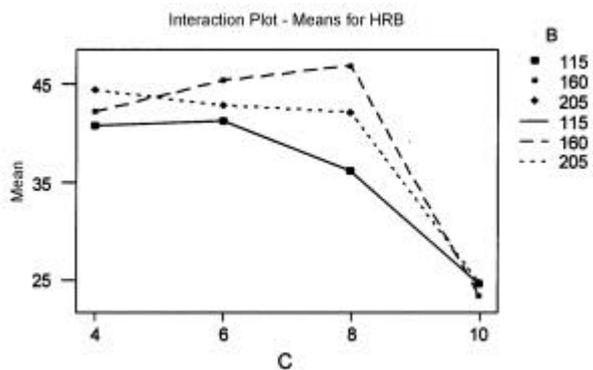
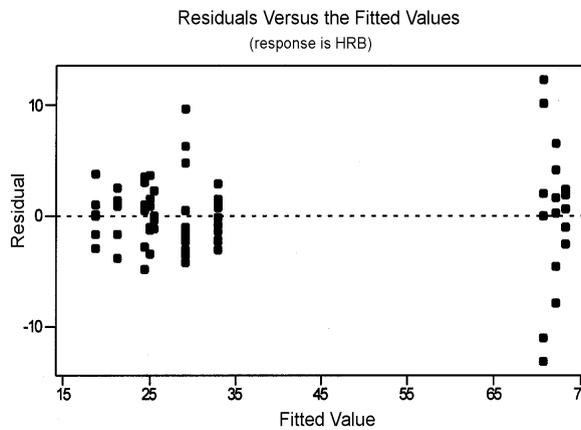
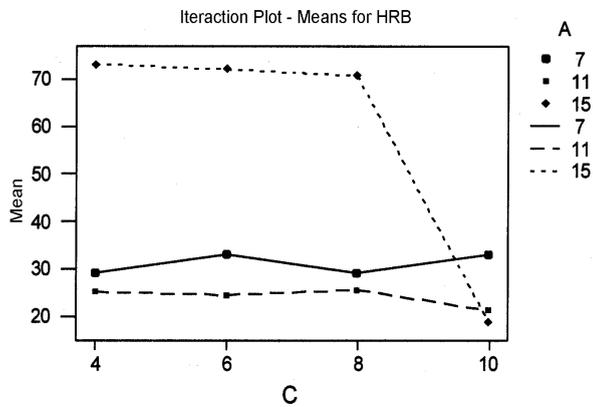
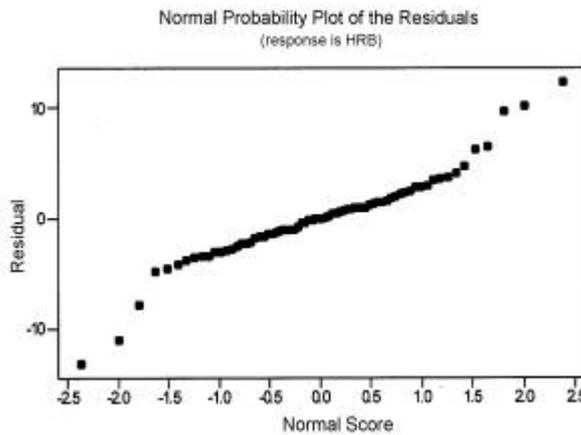
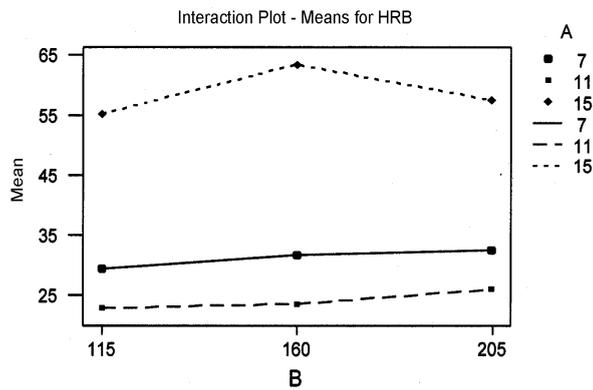
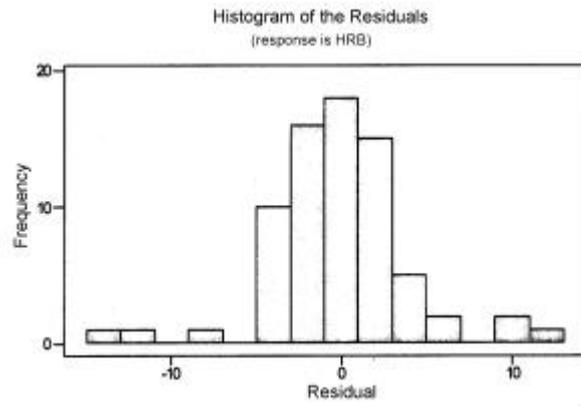
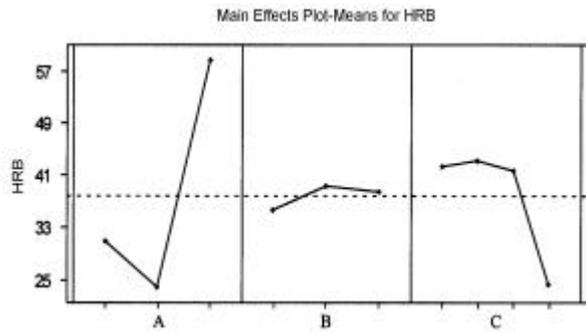
Factor	Type	Levels	Values			
A	fixed	3	7	11	15	
B	fixed	3	115	160	205	
C	fixed	4	4	6	8	10

**Analysis of Variance for HRB**

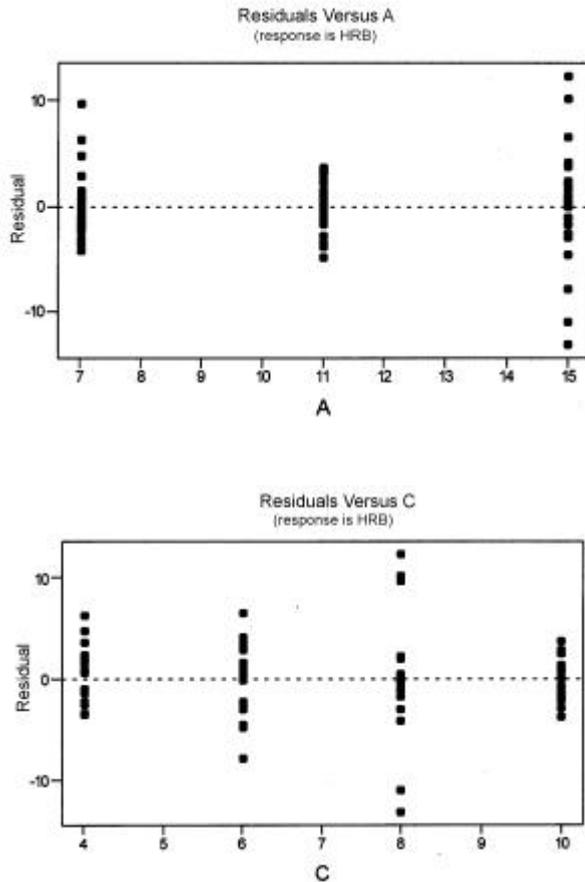
Source	DF	SS	MS	F	P
A	2	16283.40	8141.70	5050.67	0.0000
B	2	147.97	73.98	45.907	0.0000
C	3	4424.81	1474.94	914.97	0.0000
A*B	4	218.89	54.72	33.95	0.0000
A*C	6	8658.54	1443.09	895.22	0.0000
B*C	6	186.86	31.14	19.32	0.0000
A*B*C	12	411.04	34.25	21.25	
Error	36	58.03	1.61		
Total	71	30389.54			

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa  $F >> F_{tabel}$ , yang berarti semua faktor terkendali beserta interaksinya memberi pengaruh signifikan terhadap hasil proses. Namun untuk lebih memastikan apakah semua faktor yang berpengaruh signifikan sudah masuk kedalam model desain eksperimen, perlu dihitung persentase kontribusi. Hasil perhitungannya yaitu  $\rho_A = 53,5717\%$ ,  $\rho_B = 0,4763\%$ ,  $\rho_C = 14,5444\%$ ,  $\rho_{AB} = 0,69991\%$ ,  $\rho_{AC} = 28,4601\%$ ,  $\rho_{BC} = 0,5831\%$ ,  $\rho_{ABC} = 1,2890\%$ ,  $\rho_e = 0,3764\%$ . Dari persentase kontribusi didapat bahwa persentase kontribusi error sangat kecil sehingga bisa diyakinkan tidak ada faktor penting yang terabaikan. Kemudian dilakukan teknik *pooling up* untuk menarik keluar faktor yang mempunyai persentase kontribusi sangat kecil dari model. Dalam hal ini yaitu faktor temperatur dan interaksinya, sehingga model hanya dipengaruhi oleh dua faktor yaitu persentase kadar resin dan *holding time*. Kondisi ini dapat dilihat pula pada gambar 4, *main effect* dan *interaction plot* yang menunjukkan bahwa perubahan *level* temperatur tidak terlalu berarti pada kekerasan kampas rem diban-

dingkan dengan perubahan *level* persentase kadar resin dan *holding time*.



Gambar 4. Main effect dan Interaction Plot – Means for HRB untuk Uji Awal



Gambar 5. Grafik Residual untuk Hasil Pooling Up

C. Perhitungan Anova untuk hasil teknik pooling up dengan menggunakan minitab.

Analysis of Variance (Balanced Designs)					
Factor	Type	Levels	Values		
A	fixed	3	7	11	15
C	fixed	4	4	6	8
					10

Analysis of Variance for HRB					
Source	DF	SS	MS	F	P
A	2	16283.4	8141.7	477.62	0.0000
C	3	4424.8	1474.9	86.52	0.0000
A*C	6	8658.5	1443.1	84.66	0.0000
Error	60	1022.8	17.0		
Total	71	30389.5			

D. Analisa residual juga dilakukan dengan minitab. Dari gambar 5 normal probability plot terlihat bahwa residual hampir membentuk garis lurus yang berarti model sudah sesuai dengan distribusi normal sedangkan dari residual versus fitted values terlihat tidak ada kecenderungan terbentuk cone sehingga model dapat dianggap sesuai. Dari plot residual terhadap level tiap faktor, tidak terlihat adanya perbedaan mencolok pada variansi tiap level, yang mana hal ini menunjukkan tidak adanya kecenderungan tertentu dari data untuk menuju nilai tertentu diluar normal.

E. Analisa response surface methodology dengan Model Kuadrat Penuh dengan menggunakan minitab 11.12.

Response Surface Regression

Estimated Regression Coefficient for HRB

Term	Coef	StDev	T	P
Constant	30.79	23.1652	1.329	0.188
A	-17.40	3.3029	-5.267	0.000
C	24.28	4.1069	5.913	0.000
A*A	1.29	0.1419	9.087	0.000
C*C	-1.10	0.2676	-4.108	0.000
A*C	-1.07	0.1466	-7.275	0.000

S = 9.083 R-Sq = 82.1% R-Sq (adj) = 80.7%

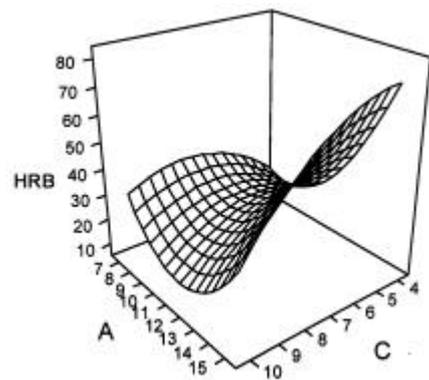
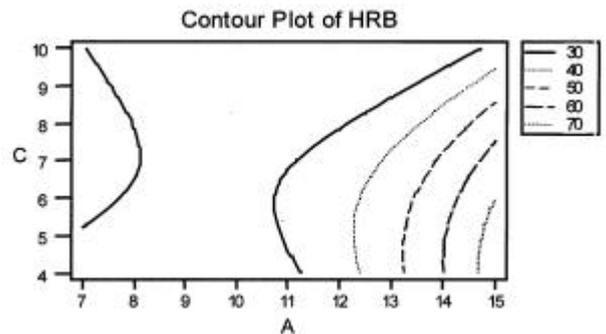
Analysis of Variance for HRB

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	24944	24944	4988.84	60.47	0.000
Linear	2	12372	5888	1943.87	35.68	0.000
Square	2	8205	8205	4102.59	49.73	0.000
Interaction	1	4367	4367	4366.68	52.93	0.000
Residual Error	66	5445	5445	82.51		
Lack-of-fit	6	4423	4223	737.09	43.24	0.000
Pure Error	60	1023	1023	17.05		
Total	71	30390				

Unusual Observation for HRB

Obs	HRB	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
47	80.900	55.962	2.271	24.938	2.84R
48	83.100	55.962	2.271	27.138	3.09R
59	15.570	32.957	3.121	-17.387	-2.04R

R denotes an aboservation with a large standardized residual



Gambar 6. Contour Plot Data Hasil Pooling Up

F. Dari hasil analisa terlihat bahwa spesimen no. 47, 48 dan 59 merupakan data tidak pada umumnya sehingga perlu dilakukan pengujian ulang terhadap spesimen tersebut. Data pengujian ulang tersebut adalah berturut-turut 80,73; 79,16 dan 17,83.

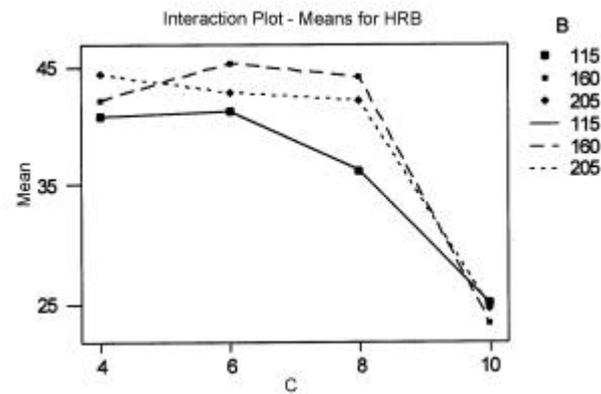
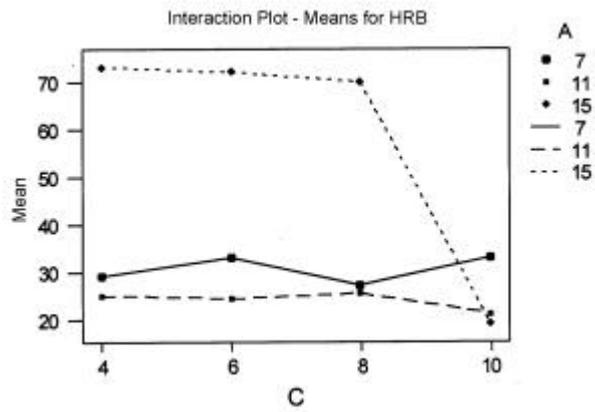
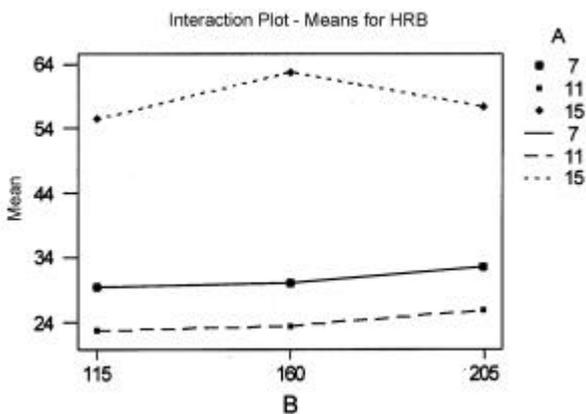
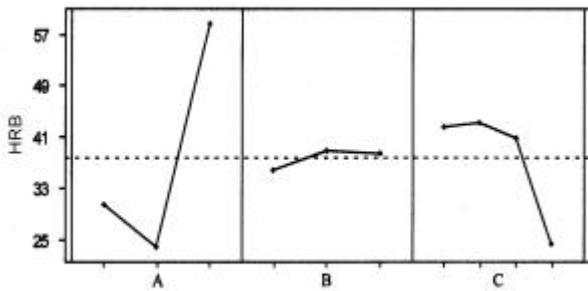
G. Perhitungan Anova untuk data pengujian ulang adalah :

Analysis of Variance (Balanced Designs)

Factor	Type	Levels	Values
A	fixed	3	7 11 15
B	fixed	3	115 160 205
C	fixed	4	4 6 8 10

Analysis of Variance for HRB

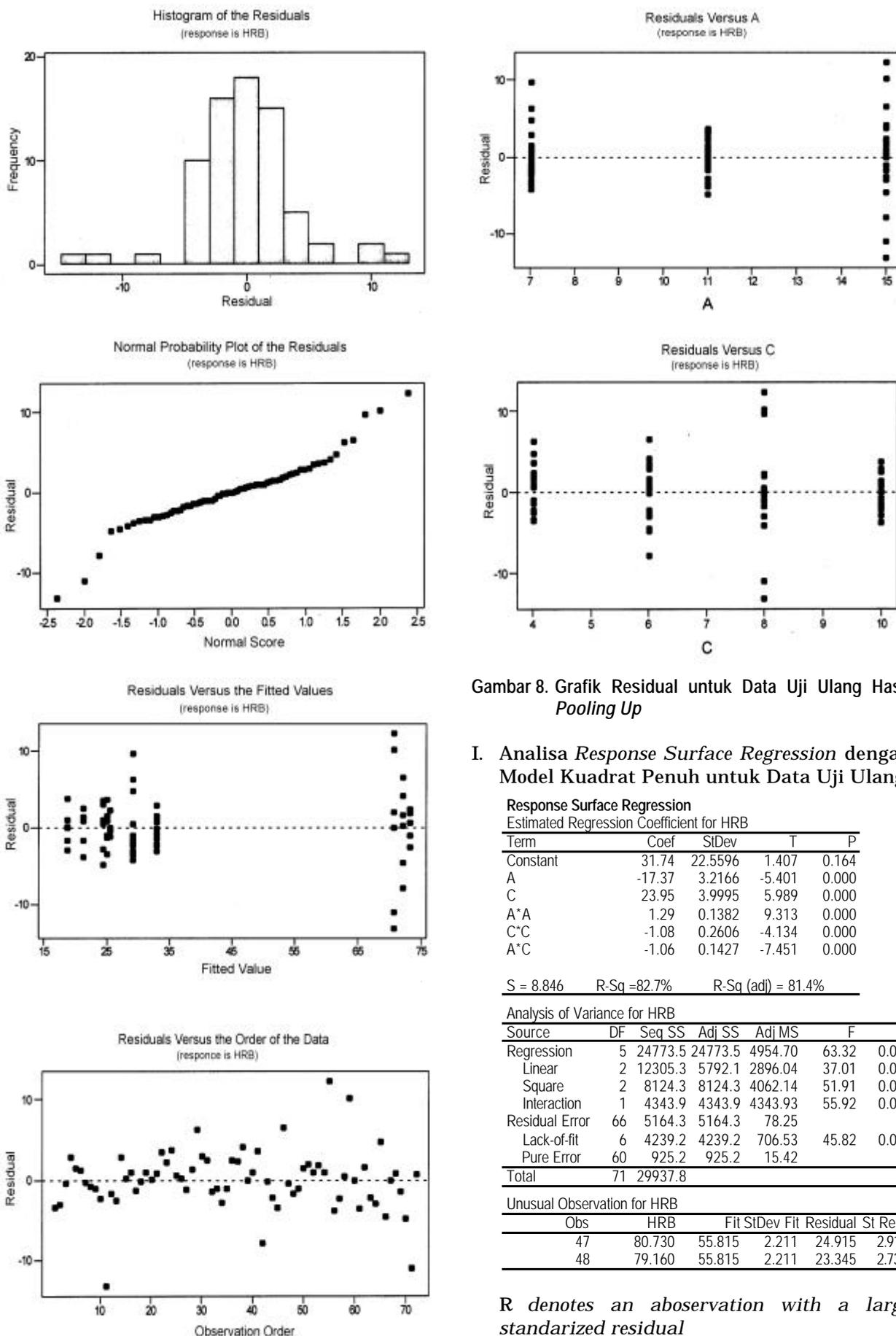
Source	DF	SS	MS	F	P
A	2	16206.07	8103.04	5179.06	0.0000
B	2	129.75	64.88	41.47	0.0000
C	3	4337.21	1445.74	924.04	0.0000
A*B	4	185.52	46.38	29.64	0.0000
A*C	6	8469.38	1411.56	902.20	0.0000
B*C	6	178.35	29.72	19.00	0.0000
A*B*C	12	375.24	31.27	19.99	0.0000
Error	36	56.32	1.56		
Total	71	29937.85			



Gambar 7. Main effect dan Interaction Plot - Means for HRB untuk Uji Ulang

Dari hasil perhitungan semua faktor terkendali beserta interaksinya memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil proses dan persentase kontribusi error yang sangat kecil. Kemudian dengan teknik *pooling up*, faktor temperatur ditarik dari model. Kondisi ini dapat dilihat pula pada *main effect* dan *interaction plot* yang menunjukkan bahwa perubahan level temperatur tidak terlalu berarti pada kekerasan kampak rem dibandingkan dengan perubahan level persentase kadar resin dan *holding time*.

H. Analisa residual seperti pada cara sebelumnya didapatkan seperti pada gambar 8 dibawah. Dari diagram yang ada juga dapat dinyatakan bahwa model sudah sesuai dengan distribusi normal dan model juga dapat dianggap sesuai.



Gambar 8. Grafik Residual untuk Data Uji Ulang Hasil Pooling Up

I. Analisa Response Surface Regression dengan Model Kuadrat Penuh untuk Data Uji Ulang.

Response Surface Regression  
Estimated Regression Coefficient for HRB

Term	Coef	StDev	T	P
Constant	31.74	22.5596	1.407	0.164
A	-17.37	3.2166	-5.401	0.000
C	23.95	3.9995	5.989	0.000
A*A	1.29	0.1382	9.313	0.000
C*C	-1.08	0.2606	-4.134	0.000
A*C	-1.06	0.1427	-7.451	0.000

S = 8.846 R-Sq = 82.7% R-Sq (adj) = 81.4%

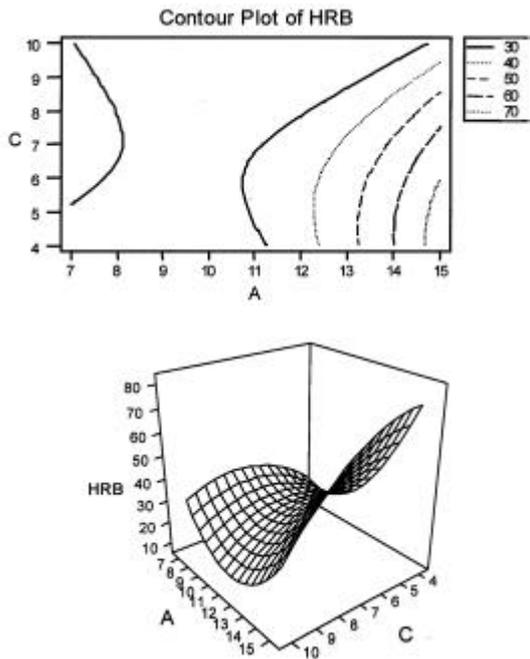
Analysis of Variance for HRB

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	24773.5	24773.5	4954.70	63.32	0.000
Linear	2	12305.3	5792.1	2896.04	37.01	0.000
Square	2	8124.3	8124.3	4062.14	51.91	0.000
Interaction	1	4343.9	4343.9	4343.93	55.92	0.000
Residual Error	66	5164.3	5164.3	78.25		
Lack-of-fit	6	4239.2	4239.2	706.53	45.82	0.000
Pure Error	60	925.2	925.2	15.42		
Total	71	29937.8				

Unusual Observation for HRB

Obs	HRB	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
47	80.730	55.815	2.211	24.915	2.91R
48	79.160	55.815	2.211	23.345	2.73R

R denotes an aboservation with a large standardized residual



Gambar 9. Contour Plot Data Uji Ulang

Dari RSM didapatkan model desain eksperimen sebagai berikut :

$$y = 31,74 - 17,37 x_1 + 23,95 x_3 + 1,29 x_1^2 - 1,08 x_3^2 - 1,06 x_1 x_3 + \varepsilon$$

## 9. Kesimpulan

Faktor-faktor yang dipilih untuk optimasi kekerasan kampas rem adalah persentase kadar resin, temperatur oven dan holding time, namun faktor temperatur oven tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan kampas rem. Untuk kondisi optimum diatur persentase kadar resin 15%, holding time 6 jam dan temperatur oven 160°C untuk mendapatkan kekerasan 60-70 HRB.

## Daftar Pustaka

1. Montgomery, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*, 4<sup>th</sup> edition. New York, 1997.
2. Belavendram, Nicolo. *Quality by Design*. London: Prentice Hall International, 1995.
3. Nicholson, geoffrey. *100 Years of Brake Linings & Clutch Facings*. Croydon: P & W Price Enterprises, Inc. 1995.
4. Bhattacharyya, Gouri K. and Johnson, Richard A. *Statistical Concepts and Methods*. New York: John Willey & Sons, 1997.