

## Optimasi Parameter Pembuatan Sampel Kampas Rem *Non-asbestos Organic* (NAO) terhadap Kekerasan dan Porositas Menggunakan Metode Taguchi

Putri Nawangsari\*, Dedy Masnur, Herisiswanto, Indra Jun  
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Kampus Bina Widya, Jl. Subrantas Km 12,5, Simpang Baru, Panam, Pekanbaru  
\*E-mail: putrinawangsari@lecturer.unri.ac.id

Diterima: 14-12-2022; Direvisi: 08-08-2023; Dipublikasi: 21-08-2023

### Abstrak

Kampas rem *Non-asbestos Organic* (NAO) mulai dikembangkan karena lebih ramah lingkungan. Pembuatan kampas rem melibatkan banyak parameter proses sehingga membutuhkan eksperimen, waktu, dan biaya yang banyak. Penelitian ini bertujuan mendapatkan parameter yang optimal pada sampel kampas rem NAO terhadap kekerasan dan porositas dengan menggunakan Metode Taguchi. Desain parameter yang digunakan terdiri dari 3 faktor terkontrol (tekanan kompaksi, temperatur *postcuring*, dan waktu *postcuring*) masing-masing parameter terdiri dari 3 level (tekanan kompaksi : 3 Ton, 4 Ton, dan 5 Ton; temperatur *postcuring*: 155 °C, 160 °C, dan 165 °C; waktu *postcuring*: 6 jam, 8 jam, dan 10 jam). Taguchi *Orthogonal Array* yang dipilih adalah  $L_9$ . Pengujian kekerasan sampel dilakukan dengan menggunakan *Rockwell* skala S dengan mengacu ASTM 785 dan pengujian porositas sampel mengacu pada JIS 4418:1996. Selanjutnya, hasil eksperimen pengujian kekerasan dan porositas dianalisa dengan menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA). Karakteristik kualitas *signal-to-noise* (*S/N ratio*) untuk respon kekerasan dipilih *large is better* dan respon porositas dipilih *smaller is better*. Hasil analisis ANOVA dan *S/N ratio* menunjukkan bahwa tekanan kompaksi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan porositas sampel. Faktor terkontrol tekanan kompaksi 5 Ton, temperatur *postcuring* 165 °C, dan waktu *postcuring* 10 jam menunjukkan parameter yang optimal untuk menghasilkan nilai kekerasan dan porositas sampel paling baik. Nilai prediksi kekerasan dan porositas pada parameter optimal yang didesain dengan Metode Taguchi menunjukkan konsisten/sesuai dengan hasil konfirmasi eksperimen dengan 95% *confidence interval* (CI).

**Kata kunci:** kampas rem *non-asbestos organic*, metode Taguchi, kekerasan, porositas, ANOVA

### Abstract

Due to environmentally friendly reasons, the brake pads were developed with non-asbestos material. Many process parameters were involved in the brake pad's making. Therefore, it requires a number of experiments, time, and funding. In this research, the Taguchi method was applied to simplify the number of experiments and obtain the optimal process parameters based on hardness and the percentage of porosity. The experiments were designed with three controlled factors (compaction pressure, post curing temperature, and post curing time). Each controlled factor consists of three levels (3, 4, and 5 Ton compaction pressure; 155, 160, and 165 °C post curing temperature; and 6, 8, and 10 hours post curing time). Orthogonal arrays were  $L_9$ . Rockwell S-scale and porosity tests were conducted to characterize the hardness and porosity. The characterization data were analyzed using ANOVA. Large is better is selected as the quality of signal-to-noise (*S/N ratio*) for hardness, while smaller is better for porosity. The result shows that hardness and porosity were significantly influenced by compaction pressure. The optimum process parameters were found at 5 Ton of compaction pressure, 165 °C post curing temperature, and 10 hours post curing time. The experiment confirmation results on the optimum parameter are in line with Taguchi's prediction with a 95% confidence interval (CI).

**Keywords:** non-asbestos organic brake pad, taguchi method, hardness, porosity, ANOVA

### 1. Pendahuluan

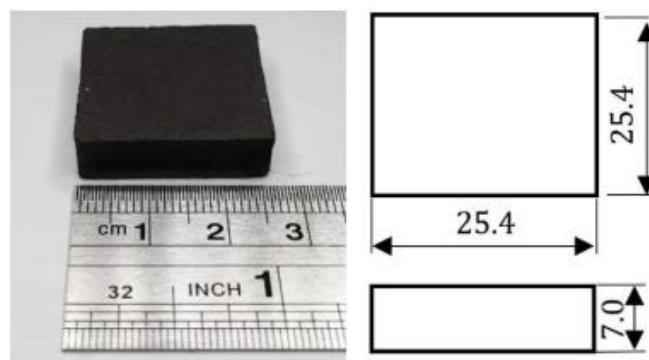
Kampas rem merupakan salah satu bagian dari sistem pengereman otomotif yang berfungsi untuk mengontrol, memperlambat, dan menghentikan laju kendaraan. Kampas rem pada kondisi ideal harus memenuhi standar kualitas yang dibutuhkan, antara lain: koefisien gesek yang tinggi dan stabil, tahan terhadap *fading* (hilangnya daya pengereman), *recovery* yang cepat (timbul daya setelah pengereman), tahan aus, tidak merusak cakram, dan ramah lingkungan [1], [2] pada berbagai kondisi operasi (temperatur, kecepatan, dan tekanan). Kampas rem NAO yang memenuhi standar kualitas tersebut harus memiliki sifat yang lebih baik untuk menghasilkan kinerja gesekan rem yang tinggi tanpa merusak bahan

dasar saat berkerja pada temperatur tinggi. Pembentukan retakan, keausan, dan proses dekomposisi pada permukaan gesekan tergantung dari sifat fisik dan mekanis, antara lain: densitas, kekerasan, dan porositas [3]. Oleh karena itu, kampas rem NAO harus memiliki kekerasan dan sifat yang diperlukan. Selain faktor material, parameter proses pembuatan/manufaktur juga berperan penting dalam menentukan sifat kampas rem NAO yang diinginkan [4][5].

Parameter proses pembuatan kampas rem NAO melalui 3 tahapan utama, yaitu: pencampuran (*mixing*), kompaksi panas (*hot compacting*), dan *postcuring*. Parameter proses manufaktur kampas rem NAO yang paling penting dan terkontrol adalah kompaksi panas dan *postcuring* [6] karena pada tahapan tersebut densitas kampas rem sangat mempengaruhi sifat fisis, mekanis, dan tribologi [7]. Ketersediaan parameter proses manufaktur kampas rem NAO sangat banyak dan bervariasi. Kondisi ini mengakibatkan pemilihan parameter proses manufaktur merupakan tugas yang sangat sulit karena membutuhkan banyak eksperimen, waktu lama, dan biaya yang besar. Desain eksperimen dengan menggunakan metode Taguchi merupakan salah satu metodologi statistik yang paling kuat untuk mempelajari pengaruh dari berbagai parameter manufaktur secara bersamaan sehingga mengurangi jumlah eksperimen secara efisien. Banyak studi literatur yang dilakukan untuk mempelajari pemilihan material dan efek formulasi kampas rem NAO terhadap sifat fisis, mekanis, dan sifat tribologi/kinerja gesekan rem. Namun, studi literatur yang mempelajari optimasi parameter proses manufaktur seperti tekanan kompaksi panas, temperatur *postcuring*, dan waktu *postcuring* dengan pendekatan statistik masih terbatas. Penelitian ini akan menentukan parameter proses manufaktur optimal pada sampel kampas rem NAO terhadap kekerasan dan porositas menggunakan Metode Taguchi.

## 2. Material dan metodologi

Material penyusun sampel kampas rem NAO terdiri dari 11 material. Formulasi sampel kampas rem NAO menggunakan fraksi volume, yaitu: *phenolic resin* 30%, *rockwool* 8%, *polyacrylonitrile* (PAN) 4%, selulose 2%, *friction dust* 10%, *barium sulfate* ( $\text{BaSO}_4$ ) 20%, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 4%, silika ( $\text{SiO}_2$ ) 4%, grafit 10%, *hexagonal boron nitride* (h-BN) 6%, dan tembaga 2%. Sampel kampas rem NAO dibuat dengan dimensi 25,4 x 25,4 x 7 mm dengan menggunakan metode metalurgi serbuk. Campuran serbuk formulasi sampel kampas rem di *mixing* selama 5 menit dengan kecepatan 45 rpm. Selanjutnya, campuran serbuk di kompaksi panas pada tekanan 3 ton, 4 ton, dan 5 ton dengan temperatur masing-masing 160 °C selama 15 menit menggunakan cetakan baja. Selama proses kompaksi panas, tekanan dilepas sebanyak 3-4 kali untuk menghilangkan gas dan uap air yang terjebak dalam cetakan saat proses polikondensasi *fenol* dan *formaldehida* [8]. Sampel yang sudah dikompaksi selanjutnya di *postcuring* dengan temperatur *poscuring* (155, 160, dan 165 °C) dengan waktu penahanan (6, 8, dan 10 jam). Sampel kampas rem yang dibuat berdasarkan desain eksperimen Taguchi seperti yang disajikan pada Gambar 1. Sampel selanjutnya diuji kekerasan dan porositas.



Gambar 1. Sampel kampas rem

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan *Rockwell* skala-S dengan mengacu pada ASTM D785. Sedangkan, pengujian porositas sampel mengacu pada standar JIS D 4418:1998. Dimensi sampel pengujian porositas adalah 25,4 mm x 25,4 x 5 mm. Sampel setelah *postcuring* diletakkan ke dalam desikator selama 24 jam dengan temperatur ruang. Hal ini digunakan untuk menghilangkan kadar air sampel akibat proses polikondensasi selama *postcuring*. Sampel ditimbang dengan ketelitian timbangan 1 mg (0,001 g) untuk mendapatkan nilai  $m_1$ . Sampel selanjutnya dimasukkan ke dalam *oilbatch* dengan temperatur  $90 \pm 10$  °C selama 8 jam. Sampel didinginkan di *oilbatch* selama 12 jam sampai oli dingin pada temperatur ruang. Permukaan sampel selanjutnya dibersihkan untuk menghilangkan oli di permukaan sampel. Sampel setelah dibersihkan ditimbang untuk mendapatkan nilai  $m_2$ . Porositas sampel dihitung dengan Persamaan 1.

$$\% \text{porositas} = \frac{m_2 - m_1}{\rho \cdot V} \times 100 \quad (1)$$

dimana,  $m_1$ : berat sampel sebelum diuji (g),  $m_2$ : berat sampel setelah diuji (g),  $\rho$ : densitas aktual sampel ( $\text{g/cm}^3$ ), dan  $V$ : volume sampel ( $\text{cm}^3$ ).

### 3. Desain Eksperimen

Eksperimen pembuatan sampel dilakukan berdasarkan desain eksperimen metode Taguchi. Faktor terkontrol yang dipilih adalah tekanan kompaksi, temperatur *postcuring*, dan waktu *postcuring*. Setiap faktor terkontrol terdiri dari tiga level seperti yang disajikan pada Tabel 1. Taguchi *orthogonal array*  $L_9(3^3)$  dengan 9 desain eksperimen dipilih sebagai dasar melakukan eksperimen dalam pembuatan sampel. Selanjutnya, pengolahan data dilakukan dengan menggunakan *software statistic* Minitab 19.1.1. Hasil pengujian dianalisis dengan ANOVA.

**Tabel 1.** Input parameter faktor terkontrol dan level

Faktor terkontrol	Kode	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
Tekanan kompaksi	A	Ton	3	4	5
Temperatur <i>postcuring</i>	B	°C	155	160	165
Waktu <i>postcuring</i>	C	jam	6	8	10

Karakter kualitas *signal-to-noise* (*S/N ratio*) untuk respon kekerasan dipilih “*large is better*” dan dihitung menggunakan Persamaan 2 [9]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

Sedangkan, karakter kualitas *S/N ratio* untuk respon porositas dipilih “*smaller is better*” dan dihitung dengan Persamaan 3 [9].

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

dimana  $y_i$ : hasil eksperimen dan  $n$ : jumlah eksperimen

Nilai prediksi pada parameter yang optimal dapat dihitung dengan Metode Taguchi dan nilai prediksi ini harus sesuai dengan hasil konfirmasi tes eksperimen. *Confidence interval* (CI) yang digunakan untuk konfirmasi tes dihitung dengan Persamaan 4 dan Persamaan 5 [9].

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F(1, n_2) \times MS_e}{N_{eff}}} \quad (4)$$

$$N_{eff} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + DoF \text{ semua faktor data } m} \quad (5)$$

dimana  $F(1, n_2)$ : nilai *F-table*,  $MS_e$  (*mean square error*): nilai *error* dari perhitungan analisis ANOVA pada data *mean*,  $N_{eff}$  : nilai efektif eksperimen.

#### 4. Hasil dan pembahasan

Matrik desain eksperimen Taguchi dan respon hasil pengujian disajikan pada Tabel 2. Setiap *orthogonal array*, hasil pengujian kekerasan dan porositas ditransformasikan ke dalam *S/N ratio*.

**Tabel 2.** Matrik Desain Eksperimen dan Hasil eksperimen berdasarkan *orthogonal array*  $L_9 (3^3)$

No Eks	Tekanan Kompaksi (Ton)	Temperatur <i>postcuring</i> ( °C)	Waktu <i>postcuring</i> (jam)	Rata-rata nilai kekerasan <i>Rockwell</i> skala S	<i>S/N ratio</i> (dB)	Rata-rata nilai porositas (%)	<i>S/N ratio</i> (dB)
1	3	155	6	62,35	35,88	18,24	14,75
2	3	160	8	66,08	36,39	18,65	14,57
3	3	165	10	69,08	36,78	18,20	14,76
4	4	155	8	75,04	37,50	16,22	15,57
5	4	160	10	76,59	37,68	12,77	17,72
6	4	165	6	74,33	37,41	11,82	17,90
7	5	155	10	80,45	38,11	10,30	19,00
8	5	160	6	80,80	38,14	12,19	18,13
9	5	165	8	81,16	38,18	10,13	19,49

##### 4.1 *S/N ratio* dan ANOVA Respon Kekerasan Sampel

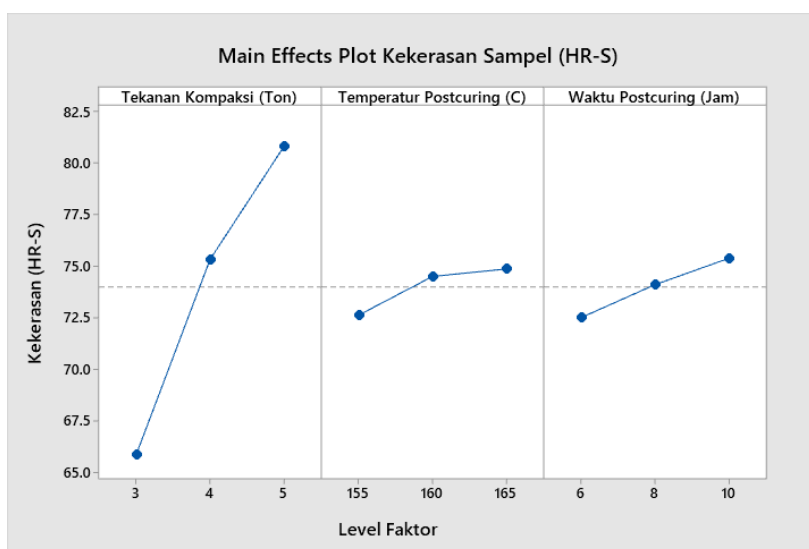
Karakteristik kualitas *S/N ratio* untuk respon kekerasan dipilih "*large is better*". Karakter kualitas ini dipilih untuk memperlihatkan bahwa nilai kekerasan yang semakin tinggi pada kampas rem akan meningkatkan umur pemakaian kampas rem [10]. Tabel 3 memperlihatkan rata-rata nilai kekerasan berdasarkan *S/N ratio* "*large is better*". Hasil menunjukkan bahwa tekanan kompaksi paling berpengaruh pada nilai kekerasan sampel, selanjutnya diikuti oleh waktu *postcuring* dan temperatur *postcuring*. Kondisi ini terlihat dari nilai delta tekanan kompaksi paling tinggi yaitu 14,97. Semakin tinggi selisih nilai delta pada *S/N ratio* maka karakteristik kualitas parameter proses semakin baik dan semakin besar pengaruh faktor tersebut terhadap respon. Selain itu, nilai delta *S/N ratio* semakin tinggi menunjukkan semakin kecil variasi karakteristik kualitas disekitar nilai target dan semakin kuat/kokoh suatu proses terhadap faktor gangguan (*noise*) yang ada [9][11].

**Tabel 3.** Rata-rata nilai kekerasan berdasarkan karakteristik kualitas *S/N ratio (large is better)*

Level	Rata-rata Kekerasan Sampel		
	Tekanan kompaksi (Ton)	Temperatur <i>postcuring</i> (°C)	Waktu <i>postcuring</i> (Jam)
1	65,84	72,61	72,49
2	75,32	74,49	74,09
3	80,81	74,86	75,37
Delta	14,97	2,25	2,88
Rank	1	3	2

Gambar 1 merupakan grafik respon analisis Taguchi untuk nilai kekerasan. Hasil memperlihatkan bahwa peningkatan kekerasan sampel dipengaruhi oleh peningkatan tekanan kompaksi, temperatur *postcuring*, dan lamanya waktu *postcuring*. Hasil ini dikaitkan karena tekanan kompaksi sangat mempengaruhi *green density* sampel. Selama kompaksi, serbuk meregang atau *work hardening*, volume menurun, sedangkan kekerasan dan densitas sampel meningkat [7]. Peningkatan tekanan kompaksi menyebabkan deformasi plastis antar partikel serbuk sehingga densitas dan kekerasan sampel meningkat [12][13]. Tekanan kompaksi rendah, partikel serbuk akan menata ulang (*rearrangement*) dan gerakan mendominasi densifikasi. Sedangkan, densifikasi yang terjadi pada tekanan kompaksi tinggi disebabkan oleh deformasi plastis kontak antar partikel serbuk [14][15].

*Postcuring* merupakan salah satu proses yang mendasar dan penting dalam pembuatan kampas rem. Proses *postcuring* secara bertahap mengurangi volume porositas, meningkatkan keseragamana *curing*, dan berperan terhadap sifat fisik dan mekanik produk akhir. Gambar 1 memperlihatkan bahwa kekerasan meningkat seiring dengan peningkatan waktu *postcuring* dari 6 jam sampai 10 jam dan temperatur *postcuring* dari 155 °C sampai 165 °C. Waktu *postcuring* yang lama menyebabkan sampel menjadi padat (*dense*), porositas menurun, dan kekerasan meningkat [7]. Namun, densitas sampel yang tinggi lebih mudah dicapai dengan peningkatan temperatur *postcuring* dibandingkan dengan waktu *postcuring*. Temperatur *postcuring* yang relative rendah menurunkan laju pembentukan *crosslinking phenolic resin* sebagai pengikat (*binder*) sehingga menurunkan kekuatan ikat *phenolic resin* sebagai *binder* dan kekerasan sampel [16]. Sebaliknya, peningkatan temperatur *postcuring* menyebabkan proses *curing* dan *crosslinking phenolic resin* selesai. Temperatur *postcuring* yang meningkat juga menyebabkan penurunan viskositas serbuk *phenolic resin* yang meleleh sehingga permeabilitas *phenolic resin* mengikat keseluruhan bahan penyusun sampel.



**Gambar 2.** Main Effects Plot Kekerasan Sampel (HR-S)

**Tabel 4.** ANOVA untuk Respon Kekerasan Sampel

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Contribution</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F-value</i>	<i>p-value</i>
Tekanan kompaksi (Ton)	2	344,020	93,05%	344,020	172,010	76,67	0,013
Temperatur <i>postcuring</i> (°C)	2	8,707	2,36%	8,707	4,354	1,94	0,340
Waktu <i>postcuring</i> (Jam)	2	12,502	3,38%	12,502	6,251	2,79	0,264
<i>Error</i>	2	4,487	1,21%	4,487	2,244		
Total	8	369,717	100,00%				

Tabel 4 menunjukkan hasil analisis ANOVA terhadap respon kekerasan. Hasil memperlihatkan bahwa faktor terkontrol tekanan kompaksi dengan *confidence interval* 95% memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan sampel ( $p\text{-value} < 0,05$ ) dan memberikan kontribusi sebesar 93,05%. Sedangkan, faktor terkontrol temperatur *postcuring* dan waktu *postcuring* memberikan pengaruh yang tidak signifikan ( $p\text{-value} > 0,05$ ) dengan presentasi kontribusi masing-masing faktor sebesar 3,38% untuk waktu *postcuring* dan 2,38% untuk temperatur *postcuring*. Tekanan kompaksi memberikan kontribusi yang signifikan terhadap nilai kekerasan sampel. Peningkatan tekanan kompaksi menyebabkan peningkatan deformasi plastis antar partikel serbuk, sehingga meningkatkan (*bulk density*) kerapatan volumetrik yang mengakibatkan kekerasan semakin meningkat [17][18]. Azevedo (2017) [14] juga menyatakan bahwa peningkatan tekanan kompaksi akan menyebabkan peningkatan kontak area antar partikel serbuk dan meningkatkan densitas sampel.

#### 4.2 S/N ratio dan ANOVA Respon Porositas Sampel

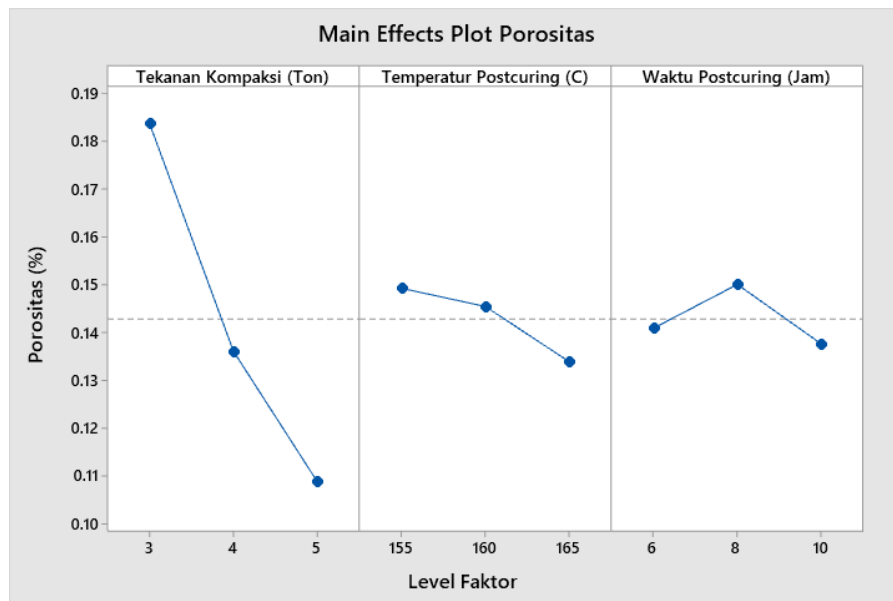
Tabel 5 merupakan rata-rata porositas berdasarkan karakteristik kualitas *S/N ratio* “*smaller is better*”. Hasil memperlihatkan bahwa tekanan kompaksi merupakan faktor yang paling berpengaruh (ranking-1) terhadap porositas minimum sampel. Hasil ini berdasarkan dari nilai delta tekanan kompaksi paling tinggi, yaitu 7,49. Faktor yang berpengaruh diranking ke-2 adalah temperatur *postcuring* dengan nilai delta 1,54. Sedangkan, faktor yang mempunyai pengaruh yang paling kecil terhadap porositas sampel yaitu waktu *postcuring* dengan nilai delta 1,24. Semakin tinggi selisih nilai delta pada *S/N ratio* maka karakteristik kualitas parameter proses semakin baik dan semakin besar pengaruh faktor tersebut terhadap respon. Selain itu, nilai delta *S/N ratio* semakin tinggi menunjukkan semakin kecil variasi karakteristik kualitas disekitar nilai target dan semakin kuat/kokoh suatu proses terhadap faktor gangguan (*noise*) yang ada [9][11].

**Tabel 5.** Rata-rata porositas berdasarkan karakteristik kualitas *S/N ratio* (*smaller is better*)

Level	<i>Rata-rata Porositas Sampel</i>		
	Tekanan kompaksi (Ton)	Temperatur <i>postcuring</i> (°C)	Waktu <i>postcuring</i> (Jam)
1	18,37	14,92	14,08
2	13,60	14,54	15,00
3	10,87	13,38	13,76
Delta	7,49	1,54	1,24
Rank	1	2	3

Gambar 3 merupakan *main plot effect* untuk respon porositas sampel. Hasil analisis memperlihatkan bahwa porositas sampel menurun seiring dengan meningkatnya level faktor tekanan kompaksi, kemudian temperatur *postcuring*, dan waktu *postcuring*. Level faktor yang menghasilkan respon porositas minimum terjadi pada faktor tekanan kompaksi level

3 (5 Ton), faktor temperatur *postcuring* level 3 (165 °C), dan faktor waktu *postcuring* level 3 (10 jam). Kondisi ini disebabkan karena tekanan kompaksi memberikan pengaruh terhadap densifikasi sampel [18]. Semakin meningkat tekanan kompaksi maka densifikasi sampel semakin meningkat dan porositas menurun. Tekanan kompaksi rendah, campuran partikel serbuk menata ulang (*rearrangement*) dan pergerakan campuran serbuk didominasi oleh densifikasi sehingga ruang antar partikel serbuk mengecil [19]. Selanjutnya, tekanan kompaksi meningkat, partikel serbuk mulai menahan tekanan kompaksi yang diberikan dan volume campuran serbuk dalam cetakan konstan dan densifikasi mulai terjadi.



**Gambar 3.** Main Effects Plot Porositas Sampel

Kondisi ini menyebabkan densitas sampel meningkat dan porositas menurun. Tekanan kompaksi yang semakin meningkat melebihi ketahanan tekan campuran serbuk dan deformasi plastis terjadi. Deformasi plastis menyebabkan peningkatan kontak area antar partikel serbuk sehingga densitas sampel semakin meningkat dan porositas menurun [20]. Seyednezhad dkk., (2017)[17] juga menyatakan bahwa peningkatan kontak area antar partikel serbuk menyebabkan penurunan porositas. Gambar 3 juga memperlihatkan bahwa porositas sampel menurun dengan peningkatan temperatur *postcuring* 155 ke 165°C dan peningkatan waktu *postcuring* 6 ke 10 jam. Peningkatan temperatur *postcuring* akan meningkatkan densitas *crosslinking phenolic resin* [21][22]. Selain itu, peningkatan temperatur *postcuring* menyebabkan penurunan viskositas pengikat *phenolic resin* yang meleleh dan permeabilitas *phenolic resin* mengikat keseluruhan bahan penyusun sampel sehingga densitas meningkat dan porositas menurun [7][23]. Porositas menurun lebih mudah dicapai dengan peningkatan temperatur *postcuring* dibandingkan dengan waktu *postcuring*. Waktu *postcuring* 10 jam memperlihatkan waktu yang cukup untuk proses pengikatan *phenolic resin* dengan bahan penyusun sampel lainnya sehingga menurunkan nilai porositas sampel.

**Tabel 6.** ANOVA untuk respon porositas sampel

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value
Tekanan kompaksi (Ton)	2	0,008672	86,48%	0,008627	0,004314	12,08	0,076
Temperatur <i>postcuring</i> (°C)	2	0,000385	3,86%	0,000385	0,000192	0,54	0,650

Waktu <i>postcuring</i> (Jam)	2	0,000249	2,50%	0,000249	0,000125	0,35	0,741
<i>Error</i>	2	0,000714	7,16%	0,000714	0,000357		
Total	8	0,009976	100,00%				

Tabel 6 memperlihatkan hasil analisis ANOVA untuk respon porositas sampel. Hasil memperlihatkan bahwa tekanan kompaksi memberikan pengaruh yang dominan terhadap penurunan porositas sampel dengan memberikan kontribusi sebesar 86,48%. Seperti pada penjelasan sebelumnya pengaruh tekanan kompaksi terhadap nilai kekerasan. Peningkatan tekanan kompaksi akan menyebabkan peningkatan kontak area antar partikel serbuk dan meningkatkan densitas sampel sehingga porositas menurun[24]. Sedangkan, temperatur *postcuring* dan waktu *postcuring* memberikan pengaruh yang kurang dominan terhadap penurunan porositas, dengan kontribusi masing-masing sebesar 3,86% (temperatur *postcuring*) dan 2,50% (waktu *postcuring*).

#### 4.3 Eksperimen Konfirmasi dengan Confidence Interval 95%

Eksperimen konfirmasi dilakukan untuk validasi terhadap kesimpulan yang diperoleh. Eksperimen konfirmasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi variabel proses yang dihasilkan pada parameter yang optimal (tekanan kompaksi 5 ton, temperatur *postcuring* 165 °C, dan waktu *postcuring* 10 jam). Hal ini dilakukan untuk membandingkan interval keyakinan rata-rata hasil prediksi dengan interval rata-rata hasil eksperimen. Eksperimen konfirmasi dilakukan sebanyak tiga kali untuk respon kekerasan dan porositas sampel. Hasil nilai prediksi dan nilai rata-rata eksperimen konfirmasi untuk masing-masing respon disajikan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

**Tabel 7.** Nilai prediksi (95% confidence interval) nilai rata-rata respon kekerasan dan porositas pada parameter optimal

Respon	nilai prediksi ( $\mu$ prediksi)	F(1,n <sub>2</sub> )	MSe	95% CI
Kekerasan (HRS)	83,06	81,40	4,487	9,73
Porositas (%)	9,5	12,97	0,000714	4,9

**Tabel 8.** Nilai rata-rata hasil eksperimen konfirmasi pada parameter optimal

Respon	Hasil eksperimen			Rata-rata
	1	2	3	
Kekerasan (HRS)	86,05	85,72	84,89	85,55
Porositas (%)	9,69	13,52	12,20	11,8

Tabel 7 memperlihatkan data hasil perhitungan nilai prediksi untuk respon kekerasan dan porositas dengan tingkat kepercayaan 95% CI (*confidence interval*). Model persamaan (interval keyakinan) nilai prediksi respon kekerasan dan porositas pada parameter yang optimum sebagai berikut:

- a. Nilai prediksi respon kekerasan ( $73,33 \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq 92,79\%$ )
- b. Nilai prediksi porositas ( $4,6 \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq 14,4$ )

Tabel 8 merupakan hasil nilai rata-rata eksperimen konfirmasi untuk respon kekerasan dan porositas sampel para parameter yang optimal. Hasil memperlihatkan bahwa nilai rata-rata eksperimen konfirmasi berada di dalam interval nilai



prediksi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi level parameter proses pada kondisi optimal yang telah didapat adalah valid.

## 5. Kesimpulan

Parameter optimal pembuatan sampel kampas Rem *Non-asbestos Organic (NAO)* menggunakan Metode Taguchi terhadap nilai kekerasan dan porositas adalah tekanan kompaksi 5 Ton, temperatur *postcuring* 165 °C, dan waktu *postcuring* 10 jam. Parameter optimal tersebut valid karena hasil konfirmasi tes (nilai kekerasan 85,55 dan porositas 11,8) masuk dalam interval nilai prediksi yang diijinkan. Parameter ini dapat dijadikan sebagai rujukan bagi industri dalam pembuatan kampas rem NAO.

## Daftar Pustaka

- [1] S. N. Nagesh, C. Siddaraju, S. V. Prakash, and M. R. Ramesh, "Characterization of Brake Pads by Variation in Composition of Friction Materials," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 295–302, 2014.
- [2] B. D. Bachchhav and K. N. Hendre, "Wear Performance of Asbestos-Free Brake Pad Materials," vol. 16, no. 4, pp. 459–469, 2022.
- [3] A. L. Crăciun and C. Pinca-Bretotean, "Advanced materials with natural fibred reinforced aluminiu composite for automotive brake disc," *Solid State Phenom.*, vol. 254, no. August, pp. 91–96, 2016.
- [4] A. M. Zaharudin, R. J. Talib, M. N. Berhan, S. Budin, and M. S. Aziurah, "Taguchi method for optimizing the manufacturing parameters of friction materials," *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 83–88, 2012.
- [5] M. Modi, G. Agarwal, V. Patil, U. Bhatia, and R. Pancholi, "Parametric optimization in drilling of Al-SiC composite using taguchi method," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 9, pp. 2019–2022, 2019.
- [6] A. O. A. Ibhadode and I. M. Dagwa, "Development of Asbestos-Free Friction Lining Material from Palm Kernel Shell," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 166–173, 2008.
- [7] R. Ertan and N. Yavuz, "An experimental study on the effects of manufacturing parameters on the tribological properties of brake lining materials," *Wear*, vol. 268, no. 11–12, pp. 1524–1532, 2010.
- [8] P. Nawangsari, Jamasri, and H. S. B. Rochardjo, "Effect of Phenolic Resin on Density, Porosity, Hardness, Thermal Stability, and Friction Performance as A Binder in Non-Asbestos Organic Brake Pad," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 547, no. 1, 2019.
- [9] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*. 2010.
- [10] R. B. Mathur, P. Thiyagarajan, and T. L. Dhama, "Controlling the Hardness and Tribological Behaviour of Non-asbestos Brake Lining Materials for Automobiles," vol. 5, no. 1, pp. 6–11, 2004.
- [11] K. Dehnad, *Quality Control, Robust Design, and The Taguchi Method*. 1989.
- [12] G. S. Upadhyaya, "Powder Metallurgy Technology," *Cambridge Int. Sci. Publ.*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [13] F. T. and R. Oberacker, *Introduction to Powder Metallurgy*. 1993.
- [14] J. M. C. Azevedo, A. C. Serrenho, and J. M. Allwood, "The deformation of metal powder particles: Hardness and microstructure," *Procedia Eng.*, vol. 207, pp. 1200–1205, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.870.
- [15] L. R. O. H.F. Fischmeister, E. Artz, "particle deformation and sliding of spherical powders.PDF," *Powder Metallurgy*, vol. 21, no. 4. pp. 179–187, 1978.
- [16] Ö. Güney and E. Demirkesen, "Influence of Curing Conditions on the Mechanical Properties of Silica-Phenolic Composites : A Comprehensive Study," vol. 2, no. 11, 2015.

- [17] M. Seyednezhad, A. Rajabi, A. Muchtar, M. Rao, and P. Ooshaksaraei, "Journal of Asian Ceramic Societies Effect of compaction pressure on the performance of a non-symmetrical NiO – SDC / SDC composite anode fabricated by conventional furnace," *Integr. Med. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 77–81, 2017.
- [18] W. Wang, "Effect of Powder Type and Compaction Pressure on the Density , Hardness and Oxidation Resistance of Sintered and Steam-treated Steels," vol. 16, no. October, pp. 533–538, 2007.
- [19] R. German, *Powder Metallurgy and Particulate Material Processing*. 1992.
- [20] F. Yusubov, "Optimum design of brake friction composites," vol. 30, no. August, pp. 133–148, 2021.
- [21] A. Aruniit, J. Kers, A. Krumme, T. Poltimäe, and K. Tall, "Preliminary Study of the Influence of Post Curing Parameters to the Particle Reinforced Composite ' s Mechanical and Physical Properties," vol. 18, no. 3, 2012.
- [22] A. W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, and J. Mendes, "Effect of very high compaction pressures on the physical and mechanical properties of earthen materials," vol. 14004, 2016.
- [23] D. Pupan, C. Suvanjumrat, and W. Chookaew, "Effect of Post-Curing Temperature and Mechanical Surface Treatment on Shear-Bond Strength of Asbestos-Free Brake Pad," *Key Eng. Mater.*, vol. 751, pp. 131–136, Aug. 2017.
- [24] A. P. Composites *et al.*, "Effect of compaction pressure on microstructure , density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route Effect of compaction pressure on microstructure , density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route," 2018.