

Rekayasa Mutu Besi Beton dengan Metode Taguchi

Didik Wahjudi

Dosen Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Roche Alimin

Dosen Fakultas Teknologi Industri Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

Abstrak

Dalam usaha untuk meningkatkan kualitas besi beton jenis SR-24 dijumpai beberapa kendala. Salah satu kendalanya adalah cukup tingginya tingkat variasi karakteristik mutu *yield strength* yang terjadi. Sehingga dibutuhkan suatu penelitian terhadap faktor-faktor yang berpengaruh dan pengaturan komposisi bahan yang ideal untuk meminimalkan variasi mutu tersebut.

Untuk menyelesaikan masalah tersebut digunakan metode Taguchi dalam perancangan eksperimen. Kelebihan metode ini ialah mampu meminimalkan akibat dari variasi terhadap respon serta eksperimen dapat dilakukan dengan efisien. Langkah yang dilaksanakan ialah memilih faktor-faktor kendali dan *noise* sekaligus penentuan level-levelnya dan selanjutnya membuat matriks ortogonal untuk eksperimen. Analisa data dilakukan berdasar pengoptimalan *Signal to Noise Ratio* (SNR), analisa *Mean* serta Anova.

Hasil analisa terhadap SNR dan *mean* didapatkan kesimpulan bahwa kadar Karbon 0,1 %, kadar Silikon 0,15 %, kadar Mangan 0,5 % merupakan komposisi bahan penolong yang cukup memadai sehingga tingkat variasi *yield strength* dapat diminimalkan.

Kata kunci: Besi beton, Metode Taguchi, *yield strength*

Abstract

In attempt to increase the quality of SR-24-type iron rods several constraints are often faced. One of the problems is the high variability of yield strength quality characteristic. A research of influential factors and ideal composition of materials that can minimize quality variability is needed.

To solve the above problem Taguchi method is used in designing the experiment. The superiority of this method is the ability to minimize variability of response and the efficiency of experiment. First steps that is taken is choosing control and noise factors and determining the levels. Then, the orthogonal matrix for experiment is built. Data analysis are done by optimizing signal-to-noise ratio, analysis of means, and analysis of variance.

Result of analysis of SNR and mean give a conclusion that Carbon content of 0.1 %, Silicon content of 0.15 %, and Mangan content of 0.5 % are sufficient composition of additive material that will minimize variability level of yield strength.

Keywords: iron rods, Taguchi method, *yield strength*

1. Latar Belakang

Besi beton yang diproduksi secara umum terdiri 3 jenis *Steel Round Bar* (permukaan polos), *Steel Deform* (permukaan berulir), *Steel Shape* (bentuk kanal U). Bahan baku besi beton adalah billet, merupakan balok baja berukuran 100x100 mm, 110x110 mm, 120x120 mm dengan panjang masing-masing sekitar 170 mm sesuai permintaan. Bahan baku dari Billet

adalah besi-besi tua, skrap, serta bahan penolong yang dilebur pada *electric arc furnace* (dapur busur listrik) dan selanjutnya proses cetak menggunakan *continuous casting machine*. Bahan penolong berupa kokas, grafit, *lime* (batu kapur), *ferro alloys*, untuk mendapatkan unsur-unsur seperti C, Si, Mn, dan lainnya dimana pengaturan komposisinya turut berpengaruh terhadap mutu besi beton yang dihasilkan.

Jenis besi beton yang ingin diperbaiki mutunya adalah jenis SR 24. Proses produksi yang telah dilakukan saat ini sudah cukup baik. Pengujian mutu besi beton yang dilakukan

Catatan : Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Februari 2001. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 3 Nomor 1 April 2001.

adalah pengujian tarik, *standard Yield Strength* (Y_s) yang berlaku ialah minimal 24 kg/mm². Sedangkan yang terjadi selama ini tingkat Y_s tersebut relatif bervariasi, hal ini yang menjadi masalah dimana diinginkan mereduksi variasi tersebut sehingga dapat mengontrol mutu besi beton yang dihasilkan. Titik beratnya ialah pada pengaturan komposisi bahan maupun perlakuan proses sehingga mampu mencapai target mutu yang dikehendaki. Menyadari bahwa sifat mekanik besi beton terutama sifat tariknya dipengaruhi oleh banyak faktor seperti perubahan komposisi bahan maupun perlakuan proses selanjutnya, maka diperlukan suatu penelitian untuk dapat memperbaiki/mereka-*yasa* bahan dan proses supaya dapat memberikan perbaikan mutu pada besi beton.

Besi beton yang diproduksi termasuk dalam klasifikasi *low carbon steel* karena kadar karbonnya hanya sampai 0,3 %. Jika ada sedikit perubahan komposisi bahan akan berpengaruh pada mutu besi beton, sebagai contoh misalnya pada proses peleburan bila kadar karbon diperbanyak maka besi beton akan lebih getas, dan akan meningkatkan kekerasan tetapi keuletannya cenderung menurun. Sehingga sangat penting melakukan pengontrolan untuk menentukan komposisi bahan yang baik untuk mengurangi variasi mutu besi beton yang dihasilkan.

Untuk mengatasi masalah tersebut ada suatu metode perancangan yang berprinsip pada peningkatan mutu dengan meminimalkan pengaruh dari penyebab-penyebab perubahan (faktor derau) tanpa menghilangkan penyebab-penyebab (faktor derau) itu sendiri. Metode tersebut ialah metode Taguchi. Dengan metode ini dapat menentukan faktor-faktor mana yang cukup berpengaruh terhadap perubahan mutu besi beton khususnya tingkat *yield strength*. Metode Taguchi ini melakukan perancangan baik parameter, toleransi dari komponen, proses, serta dapat memperbaiki mutu.

2. Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan metode perancangan yang berprinsip pada perbaikan mutu dengan memperkecil akibat dari variasi tanpa menghilangkan penyebabnya. Hal ini dapat diperoleh melalui optimasi produk dan perancangan proses untuk membuat unjuk kerja/*performance* kebal terhadap berbagai penyebab variasi suatu proses yang disebut perancangan parameter.

Ada dua alat ukur utama dalam metode perancangan Taguchi, yaitu:

- Ukuran mutu selama perancangan/pengembangan. Agar didapatkan suatu indikator mutu yang baik dan dapat dipakai untuk mengevaluasi akibat perubahan suatu perancangan parameter khususnya pada unjuk kerja produk maka digunakan model *Signal-to-noise ratio* (SNR).
- Eksperimen yang efisien untuk mencari informasi tentang perancangan parameter serentak. Dari eksperimen yang dilakukan harus dapat diperoleh informasi yang saling terkait supaya perubahan-perubahan perancangan selama pembuatan dan penggunaan pelanggan dapat dihindari, serta informasi tersebut harus diperoleh dalam waktu dan bahan yang minimum. Untuk melakukan eksperimen yang efisien tersebut digunakan Matriks Ortogonal.

3. Strategi Perancangan

Langkah-langkah dalam melaksanakan strategi perancangan adalah penting sebab dapat menentukan dapat dihasilkannya rancangan yang optimal. Perancangan dengan metode Taguchi yang digunakan ialah perancangan parameter. Dalam perancangan ini ditentukan nilai faktor kendali terbaik, yang mampu meminimalkan kepekaan fungsi proses terhadap semua faktor *noise*.

Langkah-langkah dalam perancangan parameter ini adalah :

1. Mengenali fungsi utama, efek samping, dan jenis kerusakan.
2. Mengenali faktor-faktor *noise*.
3. Mengenali karakteristik mutu yang akan diamati dan fungsi-fungsi obyektif yang akan dioptimumkan.
4. Mengenali faktor-faktor kendali dan perubahan-perubahan nilainya.
5. Mengenali matriks eksperimen, selanjutnya dipilih matriks ortogonal.
6. Eksperimen berdasarkan perancangan di langkah ke-5 untuk memperoleh data hasil eksperimen.
7. Analisa data, penentuan level optimum dari faktor kendali.
8. Pemrosesan nilai-nilai parameter terbaik guna mendapatkan rancangan usulan.
9. Verifikasi rancangan usulan.

4. Perancangan Eksperimen

Proses pembuatan besi beton mempunyai beberapa faktor penting yang memberikan efek terhadap sifat mekanik khususnya sifat

tariknya. Faktor-faktor yang dianggap berpengaruh ini dipisahkan berdasarkan jenis faktor yang ada, yaitu faktor kendali dan faktor *noise*, dimana faktor *noise* merupakan faktor yang sulit untuk dikontrol dan kurang mendapat perhatian yang serius

4.1 Faktor-Faktor Kendali

Faktor kendali/kontrol merupakan faktor utama yang diteliti pengaruhnya terhadap respon. Penyetelan terhadap *level* dapat dipilih untuk meminimasi kesensitifan respon produk terhadap faktor *noise*. Adapun faktor-faktor kendali dari dalam rekayasa mutu besi beton ini yaitu :

- Kadar unsur C, karena kadar karbon berpengaruh besar untuk menentukan sifat mekanik besi beton yang dihasilkan. Kadar karbon semakin tinggi maka sifat besi beton semakin keras, kekuatan tarik menjadi tinggi tetapi sekaligus menurunkan keuletan. Sehingga perlu melakukan pengontrolan kadar karbon ini.
- Kadar unsur Si, karena kadar silikon berpengaruh terhadap struktur mikro besi beton. Kadar silikon yang rendah, mengakibatkan besi menjadi keropos/beringga akibat banyaknya gas yang tidak terikat sewaktu peleburan. Sehingga dengan pengaturan kadar unsur silikon diharapkan struktur besi beton menjadi lebih baik. Penambahan bahan untuk unsur ini menggunakan batuan silika dengan kadar silikon 99 %.
- Kadar unsur Mn, karena kadar mangan berpengaruh besar pada *ductility* (keuletan) besi beton yang dihasilkan. Kadar unsur mangan yang terlalu banyak berakibat sifat ulet menjadi lebih tinggi dan sekaligus dapat menurunkan kekerasan besi beton. Penambahan unsur mangan dalam proses peleburan juga memakai bebatuan dengan kadar mangan 60 %.

Tabel 1. Perubahan Nilai Level Faktor Kendali

Faktor	Level		
	1	2	3
A. Kadar Karbon	0,1 %	0,2 %	0,3 %
B. Kadar Silikon	0,15 %	0,225 %	0,3 %
C. Kadar Mangan	0,4 %	0,45 %	0,5 %

4.2 Faktor-Faktor Noise

Faktor-faktor *noise* yang tidak disimulasikan:

- Mutu bahan baku.
- Tingkat kinerja pekerja.
- Ketepatan pengukuran.

Faktor-faktor *noise* yang disimulasikan:

- Temperatur *billet* di dalam *burner*.
- Tekanan air untuk pendinginan *billet*.

Tabel 2. Perubahan Nilai Level Faktor Noise

Faktor	Level	
	1	2
A. Temperatur	1100 °C	1200 °C
B. Tekanan	6 kg/cm ²	7 kg/cm ²

4.3 Penentuan Fungsi Obyektif

Untuk menyatakan fungsi utama dari metode perancangan Taguchi diperlukan adanya fungsi obyektif yaitu dengan mengoptimalkan karakteristik mutu yang diinginkan. Fungsi obyektif ini penting untuk mengetahui dan menentukan tujuan utama yang ingin dicapai dalam eksperimen metode Taguchi.

Dalam rekayasa mutu besi beton ini, respon mutu yang diamati ialah *yield strength* melalui pengujian tarik. Fungsi obyektifnya adalah jenis *nominal-the best*, karena diharapkan tingkat *yield strength* tidak kurang dari 24 kg/mm², juga tidak terlalu tinggi karena tidak efisien dalam pemakaian bahan penolong. Adapun rumusan fungsi obyektif yang digunakan

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2}$$

4.4 Pemilihan Matriks Eksperimen

Pada eksperimen metode Taguchi ini digunakan 3 faktor kendali dengan 3 level yang masing-masing mempunyai derajat kebebasan 2. Maka derajat kebebasan total ditambah derajat sebesar 1 untuk rata-rata populasi (*overall mean*) adalah (3x2) + 1 = 7. Dari 7 derajat kebebasan total, 3 faktor kendali serta 3 level faktor kendali diperoleh rancangan matriks dengan 9 baris dan 3 kolom seperti terlihat pada Tabel 3. Selanjutnya masing-masing eksperimen dikombinasikan lagi dengan matriks faktor *noise*. Adapun matriks faktor *noise* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Matriks Eksperimen untuk Faktor Kendali

Eksperimen No.	Faktor Kendali		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Dimana : 1, 2, 3 = Level-level dari faktor kendali

Tabel 4. Matriks Eksperimen untuk Faktor Noise

Eksperimen No.	Faktor Noise	
	A	B
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Dimana : 1, 2 = Level-level dari faktor noise

Matriks perencanaan eksperimen yang merupakan matriks kombinasi faktor kendali dengan faktor noise yang berisi level-level tiap faktor dapat dilihat di Tabel 5.

Tabel 5. Matriks Kombinasi Faktor Kendali dan Faktor Noise

Exp. No.	Faktor Noise		Faktor Kendali		
	A Temperatur	B Tekanan	A Kadar C	B Kadar Si	C Kadar Mn
1.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,15 %	0,4 %
2.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,15 %	0,4 %
3.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,15 %	0,4 %
4.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,15 %	0,4 %
5.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,225 %	0,45 %
6.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,225 %	0,45 %
7.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,225 %	0,45 %
8.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,225 %	0,45 %
9.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,3 %	0,5 %
10.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,3 %	0,5 %
11.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,1 %	0,3 %	0,5 %
12.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,1 %	0,3 %	0,5 %
13.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,15 %	0,45 %
14.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,15 %	0,45 %
15.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,15 %	0,45 %
16.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,15 %	0,45 %
17.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,225 %	0,5 %
18.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,225 %	0,5 %
19.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,225 %	0,5 %
20.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,225 %	0,5 %
21.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,3 %	0,4 %
22.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,3 %	0,4 %
23.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,2 %	0,3 %	0,4 %
24.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,2 %	0,3 %	0,4 %
25.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,15 %	0,5 %
26.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,15 %	0,5 %
27.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,15 %	0,5 %
28.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,15 %	0,5 %
29.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,225 %	0,4 %
30.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,225 %	0,4 %
31.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,225 %	0,4 %
32.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,225 %	0,4 %
33.	1100 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,3 %	0,45 %
34.	1100 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,3 %	0,45 %
35.	1200 °C	6 kg/cm ²	0,3 %	0,3 %	0,45 %
36.	1200 °C	7 kg/cm ²	0,3 %	0,3 %	0,45 %

5. Hasil dan Analisa Eksperimen

5.1 Pelaksanaan Eksperimen

Pada pengujian tarik besi beton berdiameter 13 mm jenis SR 24, setiap eksperimen pada lembar matriks ortogonal diambil cuplikan sampel sebanyak 3 buah secara acak. Satu sampel besi beton akan diuji dipotong dengan

panjang 10 kali diameternya ditambah 200 mm (untuk keperluan pegangan saat pengujian). Jadi untuk besi beton berdiameter 13 mm maka sampel dipotong dengan panjang 230 mm. Adapun hasil pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Eksperimen

Exp No.	Yield Strength (kg/mm ²)			\bar{x}
1.	30	27	29	28,67
2.	31	29	28	29,33
3.	29	28	27	28,00
4.	30	27	28	28,33
5.	30	31	31	30,67
6.	30	31	31	30,67
7.	28	29	29	28,67
8.	31	29	29	29,67
9.	32	31	30	31,00
10.	32	29	30	30,33
11.	30	30	32	30,67
12.	30	30	33	31,00
13.	34	31	32	32,33
14.	31	33	32	32,00
15.	31	33	30	31,33
16.	31	34	32	32,33
17.	35	33	34	34,00
18.	36	33	35	34,67
19.	32	33	36	33,67
20.	34	35	36	35,00
21.	36	37	36	36,33
22.	35	37	33	35,00
23.	35	34	35	34,67
24.	36	37	33	35,33
25.	33	34	34	33,67
26.	34	34	32	33,33
27.	34	34	33	33,67
28.	34	35	33	34,00
29.	33	34	34	33,67
30.	33	35	37	35,00
31.	37	36	34	35,67
32.	35	33	33	33,67
33.	38	34	36	36,00
34.	36	34	34	34,67
35.	32	35	38	35,00
36.	34	37	36	35,67

5.2 Analisa Hasil Eksperimen

5.2.1 Analisa dengan SNR

A. Perhitungan SNR (*Signal-to-noise ratio*)
Perbandingan SNR yang dilakukan untuk jenis karakteristik mutu *yield strength* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. SNR untuk Yield Strength

Eksp. No.	A	B	C	\bar{y} (kg/mm ²)	s^2	SNR(kg/mm ²)
1	1	1	1	28,5825	0,3232	34,0273
2	1	2	2	29,92	0,9167	29,8970
3	1	3	3	30,75	0,1026	39,6454
4	2	1	2	31,9975	0,2222	36,6349
5	2	2	3	34,335	0,3696	35,0374
6	2	3	1	35,3325	0,5148	33,8471
7	3	1	3	33,6675	0,0748	41,8052
8	3	2	1	34,5025	0,9989	30,7618
9	3	3	2	35,335	0,3696	35,2868

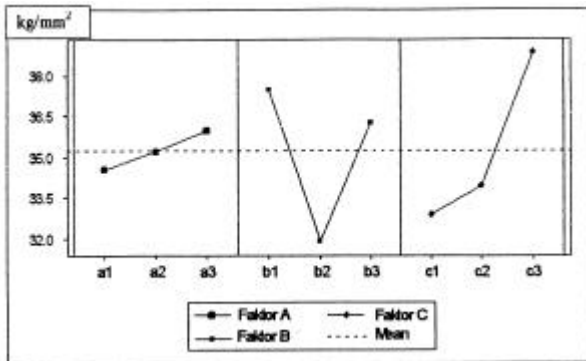
B. Perhitungan Efek Tiap Faktor

Untuk perhitungan efek tiap faktor digunakan rumus :

$$\text{efekfaktor} = \frac{1}{a} \sum \text{SNR}_0$$

Tabel 8. Efek Tiap Faktor untuk SNR

	A	B	C
Level 1	34,5232	37,4891	32,8787
Level 2	35,1731	31,8987	33,9396
Level 3	35,9513	36,2598	38,8293



Gambar 2. Efek Tiap Faktor untuk SNR

C. Perhitungan Anova (Analysis of Variance)

Hasil Anova untuk SNR dapat dilihat pada Tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Anova untuk SNR

Faktor	Average in Factor Level			df	SS	MS	F-ratio
	1	2	3				
A. Kadar Karbon	34,5232	35,1731	35,9513	2	3,067	1,534	2,53
B. Kadar Silikon	37,4891	31,8987	36,2598	2	51,783	25,891	42,75
C. Kadar Mangan	32,8787	33,9396	38,8293	2	60,445	30,222	49,90
Error				2	1,211	0,606	-
Total				8	116,506	-	-

5.2.2 Analisa dengan Mean

A. Perhitungan Mean.

Tabel 10. Mean untuk Yield Strength

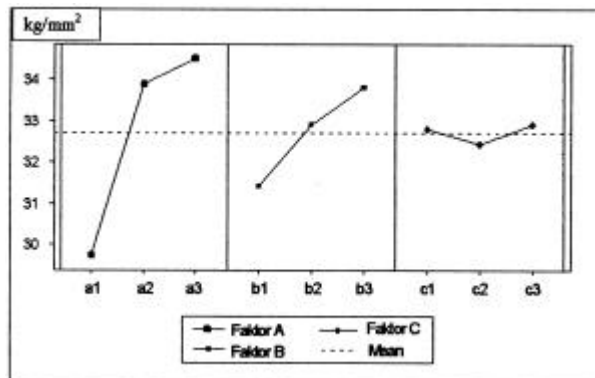
Exp No.	A	B	C	\bar{y}_i (kg/mm ²)
1.	1	1	1	28,5825
2.	1	2	2	29,92
3.	1	3	3	30,75
4.	2	1	2	31,9975
5.	2	2	3	34,335
6.	2	3	1	35,3325
7.	3	1	3	33,6675
8.	3	2	1	34,5025
9.	3	3	2	35,335

B. Perhitungan Efek Tiap Faktor

Tabel 11. Efek Tiap Faktor untuk Mean

	A	B	C
Level 1	29,7508	31,4158	32,8058
Level 2	33,8883	32,9192	32,4175
Level 3	34,5017	33,8058	32,9175

C. Grafik Efek Tiap Faktor



Gambar 2. Efek Tiap Faktor

D. Perhitungan Anova

Tabel 12. Hasil Perhitungan Anova untuk Mean

Faktor	Average in Factor Level			df	SS	MS	F-ratio
	1	2	3				
A. Kadar Karbon	29,7508	33,8883	34,5017	2	40,066	20,033	84,886
B. Kadar Silikon	31,4158	32,9192	33,8058	2	8,758	4,379	18,59
C. Kadar Mangan	32,8058	32,4175	32,9175	2	0,413	0,207	0,88
Error				2	0,471	0,236	-
Total				8	49,708	-	-

Dari perhitungan Anova baik untuk SNR maupun *mean* di atas maka dapat dilakukan analisa sebagai berikut:

a. Analisa Anova untuk SNR

Pada tingkat signifikansi 5 % ada dua faktor yang mempengaruhi *yield strength* yakni faktor B dan C karena harga F-rasionya lebih besar dari F-tabel (2,2) (0,05) = 19,00. Sedangkan untuk faktor A atau kadar karbon kurang berpengaruh sebab F-rasionya lebih kecil dari F-tabel.

b. Analisa Anova untuk Mean

Pada tingkat signifikansi 5 % terlihat hanya faktor A yang berpengaruh *yield strength* karena harga F-rasionya lebih besar dari F-tabel (2,2) (0,05) = 19,00. Sedangkan faktor

B dan C kurang berpengaruh karena F-rasionya lebih kecil dari F-tabel.

Secara lengkap Tabel berikut akan menunjukkan perbandingan untuk faktor-faktor yang berpengaruh serta faktor-faktor yang tidak berpengaruh baik dilihat dari SNR maupun *mean* setelah nilai F-ratio masing-masing faktor dibandingkan dengan F-tabel.

Tabel 13. Perbandingan Efek Faktor

Faktor	SNR	Mean
A	N	Y
B	Y	N
C	Y	N

Keterangan:

N = Menunjukkan faktor tidak berpengaruh.

Y = Menunjukkan faktor berpengaruh.

5.3 Rancangan Usulan

Dari analisa yang telah dilakukan maka diusulkan sebuah rancangan usulan sebagai berikut: A1, B1, C3

5.4 Kontribusi Persentase Faktor-Faktor

Setelah diketahui faktor-faktor yang mempunyai pengaruh terhadap hasil penelitian, maka perlu dihitung pula besar persentase faktor tersebut memberi pengaruh terhadap hasil eksperimen. Namun sebelumnya perlu dikumpulkan terlebih dahulu faktor-faktor yang tidak mempunyai pengaruh terhadap hasil pada *pooled e*. Dengan mengumpulkan faktor-faktor yang tidak berpengaruh pada *pooled e* berarti nilai *Sum of square*-nya merupakan bagian dari nilai *Sum of square error* (SE).

A. Analisa Anova untuk SNR dengan Pooling

Tabel 14. Hasil Perhitungan Anova untuk SNR dengan Pooling

Faktor	Average in Factor Level			df	SS	MS	F-ratio	SS'	p %
	1	2	3						
A. Kadar Karbon	34,5232	35,1731	35,9513	2	3,067	1,534	-	-	-
B. Kadar Silikon	37,4891	31,8987	36,2598	2	51,783	25,891	24,209	49,644	42,611
C. Kadar Mangan	32,8787	33,9396	38,8293	2	60,445	30,222	28,258	56,306	50,045
Error				2	1,211	0,606	-	-	-
Pooled e				4	4,278	1,0695	1,000	8,556	7,344
Total				6	116,506	-	-	116,506	100,00

Dari Tabel di atas dapat dilihat bahwa kontribusi varians terbesar ialah faktor C yakni sebesar 50,045 %, selanjutnya faktor B sebesar 42,611 %. Sedangkan *pooled error* hanya memberikan kontribusi sebesar 7,344 %.

B. Analisa Anova untuk Mean dengan Pooling

Tabel 15. Hasil Perhitungan Anova untuk Mean dengan Pooling

Faktor	Average in Factor Level			df	SS	MS	F-ratio	SS'	p %
	1	2	3						
A. Kadar Karbon	29,7508	33,8883	34,5017	2	40,066	20,033	12,466	36,852	74,137
B. Kadar Silikon	31,4158	32,9192	33,8058	2	8,758	4,379	-	-	-
C. Kadar Mangan	32,8058	32,4175	32,9175	2	0,413	0,207	-	-	-
Error				2	0,471	0,236	-	-	-
Pooled e				6	9,642	1,607	1,000	12,856	25,863
Total				8	49,708	-	-	49,708	100,00

Dari Tabel di atas dapat dilihat bahwa kontribusi varians terbesar ialah faktor A yakni sebesar 74,137%. Sedangkan *pooled error* hanya memberikan kontribusi sebesar 25,863 %.

5.5 Verifikasi Rancangan Usulan

Setelah rancangan komposisi bahan yang optimal telah ditentukan maka diketahui pula prediksi respon dari rancangan optimal tersebut. Kemudian barulah melakukan eksperimen verifikasi untuk dibandingkan dengan hasil prediksi respon. Jika prediksi dan eksperimen verifikasi cukup dekat satu sama lain maka dapat disimpulkan bahwa rancangan cukup memadai. Sebaliknya jika hasil eksperimen verifikasi berbeda jauh dari hasil prediksi maka dapat dikatakan rancangan belum memadai.

A. Prediksi η (SNR)

Rancangan yang diusulkan ialah A1 B1 C3, karena faktor A tidak berpengaruh terhadap SNR maka faktor tersebut tidak dimasukkan dalam prediksi η (SNR).

$$\begin{aligned} \eta \text{ prediksi} &= m + (m_{B1} - m) + (m_{C3} - m) \\ &= 35,2159 + (37,4891 - 35,2159) + \\ &\quad (38,8293 - 35,2159) \\ &= 41,1025 \end{aligned}$$

B. Prediksi Error

Penentuan varians dari prediksi *error* sangat berguna untuk mengetahui kedekatan antara η eksperimen verifikasi dengan η prediksi.

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{n} + \left(\frac{1}{n_{B1}} - \frac{1}{n} \right) + \left(\frac{1}{n_{C3}} - \frac{1}{n} \right)$$

Dimana:

n = jumlah baris dalam matriks eksperimen

n_{B1} = jumlah pengulangan level 1 dari faktor B dalam matriks

n_{C3} = jumlah pengulangan level 3 dari faktor C dalam matriks

Sehingga

$$\frac{1}{n_0} = \frac{1}{9} + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9}\right) + \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9}\right) = \frac{5}{9}$$

$$\sigma^2_{pred} = \left[\frac{1}{n_0}\right]\sigma^2_e + \left[\frac{i}{n_r}\right]\sigma^2_e$$

Dimana:

n_r = jumlah eksperimen verifikasi

Sehingga

$$\sigma^2_{pred} = \left[\frac{5}{9}\right]1,0695 + \left[\frac{1}{4}\right]1,0695 = 0,8615$$

$$\sigma_{pred} = \sqrt{0,8615} = 0,9282$$

Dengan 95 % *Confidence Interval* maka prediksi *error* sebesar $= \pm 2 \times 0,9282 = \pm 1,8193$. Sedangkan hasil eksperimen verifikasi untuk rancangan A1 B1 C3 dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16. Hasil Eksperimen Rancangan Usulan

Eksp. No.	Yield Strength (kg/mm ²)			\bar{X}_{bar}
1	29	30	29	29,333
2	32	29	29	30
3	30	28	31	29,667
4	31	29	28	29,333

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{4}(29,333 + 30 + 29,667 + 29,333) = 29,583$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{4-1} \left((29,333 - 29,583)^2 + (30 - 29,333)^2 + (29,667 - 29,583)^2 + (29,333 - 29,583)^2 \right) = 0,102$$

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{29,583^2}{0,102} = 39,335$$

Dari hasil SNR dari eksperimen verifikasi sebesar 39,335 menunjukkan rancangan cukup baik karena cukup dekat dengan prediksi SNR sebelumnya.

5.6 Perbandingan Kondisi Awal dengan Rancangan Usulan

Karakteristik mutu kondisi awal dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Kondisi Awal

Eksp. No.	Yield Strength (kg/mm ²)			\bar{X}_{bar}
1	37	32	33	34
2	36	31	33	33,333
3	31	35	32	32,667
4	34	31	30	31,667

Perbandingan antara kondisi awal dengan rancangan usulan dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Perbandingan antara Kondisi Awal dengan Rancangan Usulan

	Kondisi Awal	Rancangan Usulan
Yield Strength (kg/mm ²)	32,917 +- 3,01	29,583 +- 1,67

Dari hasil perbandingan selang kepercayaan di atas maka dapat dilihat bahwa terjadi penurunan tingkat respon tingkat *yield strength*. Hal ini bisa dikatakan cukup baik karena sudah sesuai dengan harapan dan bila dilihat dari segi efisiensi pemakaian bahan maka rancangan usulan cukup baik dibandingkan kondisi awal.

Sedangkan untuk melihat perbandingan varians antara kondisi awal dengan eksperimen verifikasi maka perlu dilakukan pengujian statistik untuk uji varians dua populasi. Dan didapat bahwa varians hasil eksperimen lebih kecil dari kondisi awal. Sehingga dengan rancangan usulan yang telah dibuat mampu menurunkan tingkat variasi pada *yield strength* besi beton.

6. Kesimpulan

- Dengan melihat uji varians antara hasil eksperimen rancangan dengan kondisi awal maka penggunaan metode perancangan Taguchi dapat meminimalkan tingkat variasi *yield strength* yang terjadi.
- Dengan melihat hasil penelitian rancangan usulan dan perbaikan mutu hasil kondisi awal maka komposisi bahan yang diusulkan ialah A1 B1 C3 (kadar Karbon 0,1 %, kadar Silikon 0,15% dan kadar Mangan 0,5%).

Daftar Pustaka

1. Bagchi, Tapan, P., *Taguchi Methods Explained: Practical steps to Robust Design*. New Delhi: Prentice-Hall, 1993.
2. De Vor, et al. *Statistical Quality Design and Control: Contemporary Concepts and Methods*. New York: Macmilan Publishing Company, 1992.
3. Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
4. Phadke, Madhav, S., *Quality Engineering Using Robust Design*. New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
5. Taguchi, Genichi, *System of Experimental Design*, Vol. 1, Michigan: American Supplier Institute, 1987.