



# TOLERANSI KOMPENSASI, BENTUK LAIN VALUE ENGINEERING DALAM PERENCANAAN DAN PENGAWASAN

M. SYAHDANULIRWAN

## RINGKASAN

*Jika diketahui distribusi-distribusi dimensi atau karakter atribut, maka pertanyaan yang sering timbul adalah bagaimana bentuk distribusi gabungan atribut tersebut.*

*Statistik menyediakan jawaban untuk pertanyaan itu. Bahkan kemungkinan lebih lanjut, yaitu toleransi kompensasi merupakan bentuk lain dari value engineering, baik dalam aspek perencanaan maupun pengawasan.*

*Dalam tulisan ini diuraikan bagaimana ide toleransi dapat diterapkan pada bidang jalan, misalnya dalam penentuan ketebalan lapis-lapis perkerasan.*

## SUMMARY

*If the dimension of distributions or the attribute character are known, the question which often appeared is how the model of the combination attribute distributions is.*

*The answered can be fined in Statistic science. Even other probability is the compensation tolerance represent other model of the value engineering either design purpose or quality control.*

*This paper will analyse how the tolerance idea can be applied in road engineering, for example in determination of pavement layer shickness.*

## LATAR BELAKANG

Pada konstruksi jalan raya, sering dijumpai bahwa suatu pekerjaan atau tipe konstruksi harus dibangun dengan memperhatikan konstruksi lain.

Misalnya perkerasan jalan di bawah jembatan atau jalan layang, ketinggian lapis pondasi atau pondasi bawah dengan mengingat drainase atau geometrik jalan, dan sebagainya. Demikian juga pada konstruksi peralatan atau mesin-mesin.

Dengan kata lain yang dimasalahkan adalah bagaimana merencanakan toleransi masing-masing konstruksi, sedemikian sehingga hasil akhir konstruksi gabungan berada pada toleransi tertentu.

Untuk jelasnya berikut ini disajikan ilustrasi bagaimana merencanakan/memproduksi Benda Uji MARSHALL pada pabrik atau bengkel Industri logam.

Alat tersebut terdiri dari 2 (dua) bagian penting, yaitu cetakan (mold) dan silinder penumbuk. Alat harus mampu menghasilkan benda uji Marshall dengan diameter 10 cm. Dengan demikian yang harus diproduksi adalah silinder penumbuk dan cetakan berdiameter 10 cm. Dari pengalaman diketahui bahwa pabrik mampu membuat silinder penumbuk diameter 10 cm dengan standar deviasi  $\sigma_x = 0.02$  cm, dan cetakan dengan standar deviasi  $\sigma_y = 0.03$  cm.

Tentunya diameter dalam cetakan harus lebih besar dari diameter silinder penumbuk sedemikian sehingga silinder bisa untuk cetakan, namun harus dijaga

bahwa jarak ruangan (clearance) tidak boleh terlalu besar. Berapakah besarnya jarak ruangan ini ?

## TOLERANSI TAMBAHAN

Kembali pada alat penumbuk benda uji Marshall, maka misalkan disepakati  $3\sigma$  sebagai batas ketelitian hasil produksi.

Pengambilan  $3\sigma$  memberi implikasi bahwa dari rata-rata produksi 800 alat, hanya 1 (satu) alat yang tidak memuaskan atau perlu diafikir, karena terlalu besar atau terlalu kecil.

Sekarang bisa kita rencanakan minimum diameter silinder = 10.00 cm, dan maksimum diameter silinder =  $10.00 + 2(3\sigma_x) = 10.12$  cm. Selanjutnya agar tidak tumpang tindih (overlap), direncanakan minimum diameter cetakan adalah 10.14 cm, dan maksimum diameter cetakan =  $10.14 + 2(3\sigma_y) = 10.32$  cm. Dengan demikian produksi alat direncanakan dengan rata-rata (mean) diameter silinder  $V_x = 10.06$  cm, dan cetakan  $V_y = 10.23$  cm.

Dari contoh di atas bisa dipastikan bahwa jarak ruangan (c) akan terletak di antara batas-batas berikut:

$$\begin{aligned} \min c &= \min y - \max x = 10.14 - 10.12 \\ &= 0.02 \text{ cm} \\ \max c &= \max y - \min x = 10.32 - 10.00 \\ &= 0.32 \text{ cm} \end{aligned}$$

Sudah cukupkah ini ?

Prosedur tersebut perlu digarisbawahi, dan Burr<sup>1)</sup> menyatakan secara gamblang : "This is a common way of thinking among engineers and has been for a very long time". Dikatakannya bahwa sebenarnya tidak ada yang salah dengan prosedur tersebut, namun melalui pemanfaatan toleransi kompensasi, statistik telah menyediakan cara yang lebih baik.

### TOLERANSI KOMPENSASI

Dari contoh di atas diketahui bahwa minimum dan maksimum jarak ruangan silinder dan cetakan adalah 0.02 cm dan 0.32 cm. Kemungkinan jarak ruangan 0.02 cm hanya timbul dari 1 per 800 produksi silinder dan 1 per 800 produksi cetakan, atau sekitar 1 per 64000 produksi alat (silinder dan cetakan) ! perhatikan kini  $C = Y - X$  dan  $V_c, V_x, V_y, \sigma_x, \sigma_y$ , serta  $x$  dan  $y$  adalah variabel random bebas, maka dapat dibuktikan bahwa <sup>2)</sup>.

$$V_c = V_y - V_x \quad \sqrt{V_c} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}$$

Dengan demikian  $\sqrt{V_c}$  bukanlah jumlah dari  $\sigma_y + \sigma_x$  seperti secara implisit dinyatakan pada prosedur awal.

Pada kenyataannya  $\sqrt{V_c}$  jauh lebih rendah dari

$$\sigma_y + \sigma_x, \text{ yaitu :}$$

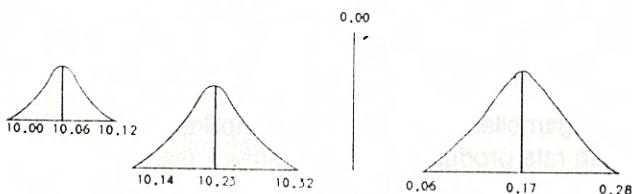
$$\sqrt{V_c} = \sqrt{(0.03)^2 + (0.02)^2} = 0.036 \text{ cm} < \sigma_y + \sigma_x = 0.050 \text{ cm}$$

Dengan mengikuti poses produksi semula :

$$V_c + 3\sqrt{V_c} = 0.17 + 3(0.036) = 0.17 \pm 0.11 \text{ cm}$$

$$\text{min } c = 0.17 - 0.11 = 0.06 \text{ cm}$$

$$\text{maks } c = 0.17 + 0.11 = 0.28 \text{ cm}$$



Gambar 1. Distribusi silinder (X), cetakan (Y), dan jarak ruangan (C).

Dari hasil tersebut terlihat bahwa batas-batas jarak ruangan telah berubah menjadi lebih rapat, dibandingkan 0.02 cm dan 0.32 cm. Jika kita ingin agar minimum jarak ruangan seperti semula, yaitu 0.02 cm, maka  $V_c$  perlu direncanakan menjadi  $0.02 + 3(0.036) = 0.13 \text{ cm}$ .

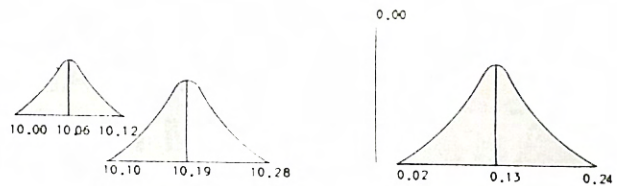
Karena  $V_c = V_y - V_x$  jadi  $V_y = V_c + V_x = 0.13 + 10.06 = 10.19 \text{ cm}$ , dan  $V_y \pm 3\sigma_y = 10.19 \pm 3(0.03) = 10.19 + 0.09 \text{ cm}$ . Dengan demikian proses produksi bisa diperbaiki menjadi :

$$V_x = 10.06 \text{ cm} \quad V_y = 10.19 \text{ cm}$$

Selanjutnya jarak ruangan (c) akan terletak di antara batas-batas berikut :

$$\text{min } c = V_c - 3\sigma_c = 0.13 - 3(0.036) = 0.02 \text{ cm}$$

$$\text{maks } c = V_c + 3\sigma_c = 0.13 + (0.036) = 0.24 \text{ cm}$$



Gambar 2. Distribusi (setelah penyesuaian) silinder (x), cetakan (Y), dan jarak ruangan (C).

Sebagai pembanding, ASTM D- 1559-76 mensyaratkan diameter cetakan (y) 10.16 cm, dan diameter minimum (x) 10.00 cm. Jika pabrik akan memenuhi presisi yang disyaratkan ASTM, maka dua hal bisa dilakukan:

- Memperbaiki cara kerja atau kemampuan mesin, agar standar deviasi diameter silinder dan cetakan bisa diperkecil. Tentunya konsekwensi biaya akan muncul.

Misalnya dengan efisiensi cara kerja diperoleh

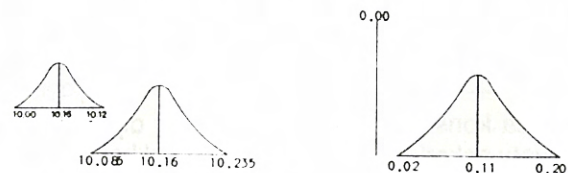
$$\sigma_x = 0,017 \text{ cm dan } \sigma_y = 0,025 \text{ cm.}$$

$$\sqrt{V_c} = \sqrt{0.017^2 + 0.025^2} = 0.03 \text{ cm}$$

$$V_c = 0.02 + 3(0.03) = 0.11 \text{ cm}$$

$$V_x = 10.10 + 3(0.017) = 10.05 \text{ cm}$$

$$X_y = V_c + V_x = 0.11 + 10.05 = 10.16 \text{ cm}$$



Gambar 3. Diskusi (cara a) silinder (x) cetakan (Y), dan jarak ruangan (C).

- Mempertahankan cara kerja yang sudah ada, dengan resiko menanggung kerugian berupa meningkatnya jumlah produk yang diafkir akibat perubahan diameter cetakan sesuai persyaratan.

$$\sigma_x = 0.02 \text{ cm} \quad \sigma_y = 0.03 \text{ cm} \quad \sqrt{V_c} = 0.036 \text{ cm}$$

$$V_c = V_y - V_x = 10.16 - 10.06 = 0.10 \text{ cm}$$

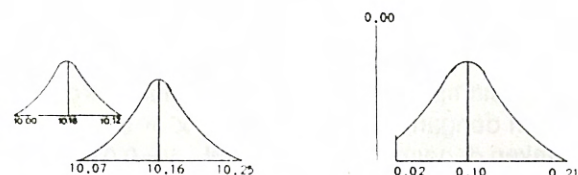
$$\text{min } c = 0.02 \text{ cm} \quad Z_1 \sqrt{V_c} = 0.02 - 0.10 = -0.08 \text{ cm}$$

$$Z_1 = \frac{-0.08}{0.036} = -2.22$$

$$0.036$$

$$\text{maks } c = 0.10 + 3(0.036) = 0.21 \text{ cm} \quad Z_2 = 3$$

Dengan  $Z_1 = -2.22$  berarti dari produksi 76 alat, maka 1 (satu) alat perlu diafkir, karena jarak ruangan (c) terlalu kecil.



Gambar 4. Distribusi (cara b) silinder (x), cetakan (Y), dan jarak ruangan (C).

Pemilihan cara a atau b tentunya dengan mempertimbangkan perbandingan antara besarnya biaya cara a, dan besarnya kerugian cara b.

### PENERAPAN PADA PENENTUAN KETEBALAN PERKERASAN

Secara umum dapat disimpulkan bahwa dengan menggabungkan dua atribut akan diperoleh manfaat berupa kompensasi terhadap toleransi : jika satu atribut rendah, maka atribut lain mungkin tinggi.

Untuk jelasnya baiklah kita lihat contoh berikut :

Km	lapis pondasi D <sub>2</sub> (mm)	lapis pondasi bawah D <sub>3</sub> (mm)
89 + 100	180	140
200	150	140
300	155	145
400	260	130
500	230	105
600	220	130
700	175	125
800	210	130
900	200	130
90 + 000	170	140
100	170	135
200	170	135
300	165	135
400	250	105
500	210	120
600	200	125
700	150	150
$\bar{x}$ (mm)	192.06	130.59
$\sqrt{\quad}$ (mm)	34.01	12.23
D rencana (mm)	170	120
$\frac{\bar{x} - D_r}{\sqrt{\quad}}$		
Z =	0.649	0.866
< Dr	25.81%	19.33%

Misalkan spesifikasi mensyaratkan tebal rencana lapis pondasi D<sub>2</sub> = 170mm dan lapis pondasi bawah D<sub>3</sub> = 120 mm, serta prosentase yang di bawah tebal rencana ≤ 15%. Jika spesifikasi ini dipegang teguh maka ketebalan lapis pondasi D<sub>2</sub>, dan ketebalan lapis pondasi bawah D<sub>3</sub> tersebut ditolak (rejected), karena prosentase di bawah tebal rencana 15%. Sekarang bagaimana jika kedua atribut (lapis perkerasan) tersebut dijadikan satu. Jika yang akan diuji bukan tebal gabungan atau elevasi, melainkan kekuatan struktur, maka perbedaan kualitas masing-masing lapis perkerasan tentu harus diperhatikan. Kiranya sudah jelas dari sudut kekuatan struktur, bahwa kekurangan tebal 20 cm pada lapis pondasi, tidak mencukupi untuk diganti dengan kelebihan tebal 20 mm pada lapis pondasi bawah.

Untuk itu perlu diberi pembobotan pada masing-masing atribut. Salah satu cara misalnya dengan koefisien kekuatan relatif (a<sub>1</sub>). Maka untuk contoh

tadi dengan a<sub>2</sub> = 0.14 dan a<sub>3</sub> = 0.12 diperoleh

$$\Sigma a_1 D_1 = 0.14 D_2 + 0.12 D_3.$$

km	0.14 D <sub>2</sub> (mm)	0.12 D <sub>3</sub> (mm)	$\hat{d}^{a_1 D_1}$
89 + 100	25.2	16.8	42.0
200	21.0	16.8	37.8
300	21.7	17.4	39.1
400	36.4	15.6	52.0
500	32.2	12.6	44.8
600	30.8	15.6	46.4
700	24.3	15.0	39.5
800	29.4	15.6	45.0
900	28.0	15.6	43.6
90 + 000	23.8	16.8	40.6
100	23.8	16.2	40.0
200	23.8	16.2	40.0
300	23.1	16.2	39.3
400	35.0	12.6	47.6
500	29.4	14.4	43.8
600	28.0	15.0	43.0
700	21.8	18.0	39.0
$\bar{x}$ (mm)			42.56
$\sqrt{\quad}$ (mm)			3.77

$$\Sigma a_1 D_1 \text{ rencana} = 0.14 * 170 + 0.12 * 120 = 38.2$$

$$Z = \frac{\bar{x} - a_1 D_1}{\sqrt{\quad}} = \frac{42.56 - 38.2}{3.77} = 1.156$$

$$< \Sigma a_1 D_1 \text{ rencana} = 12.38\%$$

Perhatikanlah bahwa prosentase di bawah besaran rencana (semula 25.8% dan 19.33%) sekarang turun menjadi 12.38% 15%.

Dapat dikatakan ini merupakan bentuk lain dari value engineering. Juga terlihat bahwa kini tinggal satu lokasi yang tidak memenuhi syarat yaitu di km 89 + 200. Pada lokasi ini kekurangan tebal 20 mm lapis pondasi (D<sub>2</sub>) tidak cukup digantikan oleh kelebihan tebal 20 mm lapis pondasi bawah (D<sub>3</sub>). Sedangkan pada km 89 + 300 kekurangan 15 mm D<sub>2</sub> dikompensasi kelebihan 25 mm D<sub>3</sub>. Sebaliknya pada km 89 + 500, kelebihan 60 mm D<sub>2</sub> menggantikan kekurangan 15 mm D<sub>3</sub>. Analog dengan km 90 + 300 km, 90 + 400, dan km 90 + 700.

### PENERIMAAN BERSYARAT

Ada dua pertanyaan muncul sehubungan contoh tersebut di atas.

- Bukankah pekerjaan D<sub>3</sub> harus ditolak atau diterima lebih dulu sebelum pekerjaan D<sub>2</sub> bisa dimulai?
- Bukankah D<sub>3</sub> dan D<sub>2</sub> memiliki fungsi yang berbeda ?

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, dikenal adanya konsep penerimaan bersyarat (conditionally accepted). Konsep ini pada mulanya untuk menjawab permasalahan dimana hasil uji pekerjaan menunjuk-

kan kualitas yang sedikit dibawah spesifikasi. Jadi ada semacam spesifikasi bersyarat disamping spesifikasi yang berlaku. Misalkan spesifikasi bersyarat berbunyi bahwa prosentase dibawah tebal rencana, untuk pondasi maupun lapis pondasi bawah, diijinkan sampai 30%.

Syarat batas ini akan menjamin bahwa masing-masing fungsi D<sub>3</sub> dan D<sub>2</sub> masih tetap ada, sedangkan pekerjaan D<sub>2</sub> bisa dimulai jika pekerjaan D<sub>3</sub> sudah diterima dengan bersyarat. Penerimaan bersyarat harus direncanakan sedemikian rupa, agar pelaksana (kontraktor) terhindar dari penalti yang berlebihan, namun masih ada pendorong bagi pelaksana, untuk menghasilkan produk sesuai spesifikasi yang berlaku. Bentuk yang umum dipakai adalah pengurangan (reduksi) harga satuan (untuk price). Pengurangan harus sedemikian rupa sehingga cukup rendah jika kualitas mendekati spesifikasi berlaku, dan cukup tinggi bila kualitas mendekati spesifikasi bersyarat.

Rantetoding<sup>3)</sup> menyarankan suatu bentuk progresif terhadap harga satuan, sebagai berikut :

$$V1 = \left( \frac{L-La}{Lt-La} \right)^2 Vt$$

V1 = harga satuan penerimaan bersyarat

L = kualitas pekerjaan yang diterima dengan bersyarat (Contoh : 25, 81 % & 19, 33 %).

La = batas kualitas spesifikasi bersyarat (Contoh : 30 %)

Lt = batas kualitas spesifikasi berlaku (Contoh : 15%)

Vt = harga satuan spesifikasi berlaku

## KESIMPULAN DAN SARAN

1. Dengan menggabungkan dua atribut, akan diperoleh manfaat berupa kompensasi terhadap toleransi. Jika satu atribut rendah, maka atribut lain mungkin tinggi.

2. Jika disamping toleransi yang berkaitan dengan satuan panjang/jarak, terkait juga faktor lain (mis: kualitas), maka diperlukan pembobotan untuk masing-masing atribut.
3. Pada penentuan ketebalan perkerasan yang berkaitan dengan kekuatan struktur, maka pembobotan masing-masing atribut dapat dilakukan dengan mencari hubungan antar atribut (mis : koefisien kekuatan relatif).
4. Untuk menjamin agar fungsi dari masing-masing atribut tetap ada, serta dipeliharanya prosedur baku, maka disarankan pemakaian konsep penerimaan bersyarat.
5. Penerimaan bersyarat haruslah direncanakan sedemikian rupa, sehingga pelaksana (kontraktor) terhindar dari penalti yang berlebihan, namun masih ada dorongan bagi terciptanya produk menurut spesifikasi yang berlaku.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Burr, I.W. "Statistical Quality Control Methods", New York, 1976.
2. Chatfield, C. "Statistics for Technology", 3rd edition, 1983.
3. Rantetoding, P. Quality Control in Highway with special reference to Statistical Techniques", University of Birmingham, 1983.

## Penulis :

*Ir. M. Sjahdanulirwan MSc. Lulus Jurusan Sipil ITB 1977, Highway Engineering for Developing Countries University of Birmingham 1985 Bekerja di Pusat Litbang Jalan sejak 1977.*

