

ESTIMASI KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN DALAM PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON

Oleh :
N. Retno Setiati

RINGKASAN

Perbedaan metoda evaluasi ketidakpastian antara produsen dan konsmen dapat menyebabkan penolakan satu paket komoditi perdagangan karena perbedaan hasil perhitungan ketidakpastian antara pihak produsen dan konsumen. Dalam era pasar global diperlukan metode untuk mengevaluasi dan menyatakan ketidakpastian yang dapat diterima di seluruh dunia sehingga pengukuran yang dilakukan dapat dibandingkan dengan mudah. Kajian ini menjelaskan prinsip evaluasi ketidakpastian bagi laboratorium penguji dan kalibrasi untuk memenuhi persyaratan SNI-19-17025-2000 tentang “Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Penguji dan Kalibrasi”. Metode evaluasi ketidakpastian pengukuran yang dijelaskan dalam kajian ini sesuai dengan ISO “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”.

SUMMARY

Compliance testing sometimes involves measured values, which lie close to the zone of uncertainty. A different method of uncertainty evaluation by foreign authority could mean rejection of a container of goods destined for import because of expansion of the recalculated zone of uncertainty. In the era of global marketplace it is imperative that the method for evaluating and expressing uncertainty be uniform throughout the world so that measurements performed in different countries can be easily compared. This study gives the recommended method for evaluating measurement uncertainty that is applicable for calibration and testing laboratories which based on SNI-19-17025-2000. The method of evaluating measurement uncertainty described in this studies in accordance with ISO “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Penilaian kesesuaian terhadap suatu produk seringkali mencakup nilai terukur, yang terletak dekat dengan zona ketidakpastian. Perbedaan metoda evaluasi ketidakpastian antara produsen dan konsumen dapat menyebabkan penolakan satu paket komoditi perdagangan karena perbedaan hasil perhitungan ketidakpastian antara pihak produsen dan konsumen.

Dalam era pasar global diperlukan metode untuk mengevaluasi dan menyatakan ketidakpastian yang dapat diterima di seluruh dunia sehingga pengukuran yang dilakukan dapat dibandingkan dengan mudah. Pedoman ketidakpastian yang dapat diterima secara internasional adalah *ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"*

Metode evaluasi ketidakpastian pengukuran yang dijelaskan dalam penelitian ini sesuai dengan *ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"*.

Untuk membantu laboratorium dalam mengimplementasikan ketidakpastian pengukuran ini, contoh evaluasi ketidakpastian untuk laboratorium pengujian akan diberikan dalam studi kasus.

1.2. Maksud dan Tujuan

Tujuan pengukuran adalah untuk menentukan nilai besaran ukur. Yang dimaksud dengan proses pengukuran

adalah suatu proses yang meliputi spesifikasi besaran ukur, metode pengukuran dan prosedur pengukuran.

Secara umum, hasil pengukuran hanya merupakan taksiran atau pendekatan nilai besaran ukur, oleh karena itu hasil tersebut hanya lengkap bila disertai dengan pernyataan ketidakpastian dari taksiran tersebut.

Ketidakpastian adalah ukuran sebaran yang secara layak dapat dikaitkan dengan nilai terukur. Yang memberikan rentang, terpusat pada nilai terukur, dimana di dalam rentang tersebut terletak nilai benar dengan kemungkinan tertentu.

Ketidakpastian hasil pengukuran mencerminkan kurangnya pengetahuan yang pasti tentang nilai besaran ukur. Hasil pengukuran setelah dikoreksi terhadap kesalahan sistematik masih berupa taksiran nilai besaran ukur karena masih terdapat ketidakpastian yang berasal dari pengaruh acak dan koreksi kesalahan sistematik yang tidak sempurna.

Konsep ketidakpastian didasarkan pada besaran teramati yang diperoleh dengan pengukuran; hal ini berbeda dengan konsep ideal kesalahan yang didasarkan pada besaran yang tidak dapat diketahui.

Kesalahan pengukuran terdiri dari dua komponen, yaitu komponen acak dan komponen sistematik. Kesalahan acak disebabkan oleh besaran berpengaruh yang tidak dapat diramalkan, stokastik terhadap waktu dan bervariasi terhadap ruang.

Kesalahan sistematik disebabkan oleh besaran berpengaruh yang dapat diamati terhadap hasil pengukuran. Perbedaan antara kesalahan dan ketidakpastian sebaiknya selalu diperhatikan. Sebagai contoh, hasil pengukuran setelah koreksi dapat secara tidak sadar dapat menjadi sangat dekat dengan nilai besaran ukur yang tidak diketahui, dan oleh karena itu mempunyai kesalahan yang dapat diabaikan, meskipun mungkin mempunyai ketidakpastian yang besar.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sumber Ketidakpastian

Dalam praktek, terdapat berbagai macam kemungkinan sumber ketidakpastian pengukuran, antara lain mencakup:

- ⇒ Definisi besaran ukur yang tidak lengkap;
- ⇒ Realisasi definisi besaran ukur yang tidak sempurna;
- ⇒ Pengambilan sampel yang tidak mewakili keseluruhan besaran ukur yang didefinisikan;
- ⇒ Pengetahuan yang tidak memadai tentang pengaruh kondisi lingkungan terhadap proses pengukuran atau pengukuran kondisi lingkungan yang tidak sempurna;
- ⇒ Bias personil dalam membaca peralatan analog;
- ⇒ Resolusi atau diskriminasi peralatan;

- ⇒ Nilai yang diberikan pada standar pengukuran atau bahan acuan;
- ⇒ Nilai konstanta dan parameter lain yang diperoleh dari sumber luar dan digunakan dalam algoritma reduksi data;
- ⇒ Pendekatan dan asumsi yang tercakup dalam metode dan prosedur pengukuran;
- ⇒ Variasi pengamatan berulang terhadap besaran ukur dalam kondisi yang tampak sama.

Interpretasi dari sumber ketidakpastian pengukuran dalam aplikasinya untuk proses pengujian dapat mencakup, tapi tidak terbatas pada:

- ⇒ Pengambilan sampel yang tidak representatif;
- ⇒ Ke-tidak-homogen-an asal sampel;
- ⇒ Kontaminasi selama pengambilan dan penyiapan sampel;

2.2. Klasifikasi Komponen Ketidakpastian

Ketidakpastian pengukuran terdiri dari beberapa komponen yang dapat diklasifikasikan menurut metode yang digunakan untuk menaksir nilai numeriknya:

- ⇒ **Tipe A** : yang dievaluasi dengan analisis statistik dari serangkaian pengamatan.
- ⇒ **Tipe B** : yang dievaluasi dengan cara selain analisis statistik dari serangkaian pengamatan.

Klasifikasi komponen ketidakpastian ke dalam tipe A dan tipe B tidak selalu mempunyai hubungan langsung dengan klasifikasi

komponen ketidakpastian sebagai ketidakpastian acak dan sistematis.

Sifat komponen ketidakpastian dikondisikan oleh fungsi yang dimiliki oleh besaran yang diukur, yang ditunjukkan dalam model matematis proses pengukuran. Bila besaran yang terlibat dalam pengukuran digunakan dalam fungsi berbeda, komponen acak bisa berubah menjadi komponen sistematis dan sebaliknya. Untuk menghindari kesalahan pemahaman sebaiknya istilah ketidakpastian acak dan ketidakpastian sistematis tidak digunakan. Suatu alternatif istilah yang dapat digunakan dalam klasifikasi komponen ketidakpastian adalah:

- ⇒ "komponen ketidakpastian yang berasal dari pengaruh acak," dan
- ⇒ "komponen ketidakpastian yang berasal dari pengaruh sistematis."

Pengaruh acak adalah yang memberikan penambahan kemungkinan kesalahan acak dalam proses pengukuran yang sedang dilakukan dan pengaruh sistematis adalah yang memberikan kemungkinan penambahan kesalahan sistematis dalam pengukuran yang sedang dilakukan.

Dalam pengukuran, sebuah komponen ketidakpastian yang berasal dari pengaruh sistematis yang dalam suatu kasus dievaluasi dengan evaluasi tipe A, dalam kasus yang lain dengan evaluasi tipe B, demikian juga komponen ketidakpastian yang berasal dari pengaruh acak.

2.3. Pemodelan Pengukuran

Dalam konteks evaluasi ketidakpastian pengukuran, model pengukuran memerlukan pernyataan yang jelas tentang besaran yang sedang diukur, dan pernyataan kuantitatif yang menunjukkan hubungan antara nilai besaran ukur dan parameter bebas dimana besaran ukur tersebut bergantung. Parameter tersebut bisa berupa besaran ukur lain, besaran yang tidak langsung diukur, atau suatu konstanta. Suatu fungsi yang menghubungkan besaran yang diukur dengan besaran masukan disebut dengan *model pengukuran*.

Dalam sebagian besar proses pengukuran, besaran ukur Y ditentukan dari N besaran lain yaitu X_1, X_2, \dots, X_N melalui hubungan fungsional berikut:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \dots\dots\dots(1)$$

Besaran masukan tersebut X_1, X_2, \dots, X_N dimana besaran ukur Y dapat dipandang sebagai besaran ukur yang bergantung pada besaran lain, termasuk koreksi dan faktor koreksi untuk kesalahan sistematis yang dikenali, hal ini dapat menyebabkan hubungan fungsional kompleks yang mungkin tidak pernah dapat ditulis secara eksplisit.

Besaran masukan X_1, X_2, \dots, X_N dapat mempunyai nilai dan ketidakpastian yang ditentukan secara langsung dari proses pengukuran yang sedang dilakukan. (seperti dari suatu pengamatan tunggal, pengamatan berulang, penentuan koreksi

terhadap pembacaan instrumen dan koreksi dari besaran berpengaruh) atau diperoleh dari sumber luar (seperti besaran terkait dengan standar pengukuran terkalibrasi, bahan acuan bersertifikat dan data acuan dari *handbook*).

Suatu taksiran dari besaran ukur Y , dinyatakan dengan y , diperoleh dari persamaan model pengukuran menggunakan taksiran besaran input x_1, x_2, \dots, x_N , untuk nilai dari N besaran masukan X_1, X_2, \dots, X_N , oleh karena itu taksiran besaran ukur y , yang merupakan hasil dari proses pengukuran, diberikan dengan:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Bila diasumsikan bahwa setiap besaran input telah dikoreksi terhadap semua pengaruh sistematis yang dikenali yang memberi pengaruh signifikan terhadap taksiran keluaran, taksiran simpangan baku yang berkaitan dengan taksiran keluaran, disebut sebagai ketidakpastian baku gabungan (dinyatakan sebagai $u_c(y)$) diperoleh dengan menggabungkan taksiran simpangan baku dari setiap taksiran masukan x_i yang disebut sebagai simpangan baku (dinyatakan sebagai $u(x_i)$). Setiap ketidakpastian baku $u(x_i)$ diperoleh baik dari evaluasi tipe A atau tipe B.

2.4. Evaluasi Ketidakpastian Baku Tipe A

Bila pengukuran diulangi beberapa kali, nilai rata-rata dan simpangan

baku-nya dapat dihitung. Simpangan baku menggambarkan sebaran nilai yang dapat digunakan untuk mewakili seluruh populasi nilai terukur.

Dalam sebagian besar kasus, taksiran terbaik yang tersedia dari harapan atau nilai harapan terhadap suatu besaran yang bervariasi secara acak, yang diperoleh dari n pengamatan berulang yang saling bebas dalam kondisi pengukuran yang sama adalah nilai rata-rata dari hasil n pengamatan:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots(2)$$

Simpangan baku adalah suatu taksiran sebaran populasi dimana n nilai tersebut diambil, yaitu:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(3)$$

Setelah melakukan satu kali n pengamatan berulang, kemudian dilakukan pengamatan kedua dari n pengamatan berulang maka nilai rata-rata dapat dihitung lagi. Kemungkinan akan terjadi sedikit perbedaan antara rata-rata dari n pengamatan kedua dari rata-rata pertama. Taksiran sebaran dari rata-rata populasi dapat dihitung dari simpangan baku rata-rata eksperimental (ESDM):

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(4)$$

Ketidakpastian baku tipe A, $u(x_i)$ dari suatu besaran yang ditentukan dari n pengamatan berulang yang saling bebas adalah nilai ESDM:

$$u(x_i) = s(\bar{x}) \dots\dots\dots(5)$$

Dalam beberapa kasus perlu untuk mengetahui jumlah derajat kebebasan v , untuk satu set n pengukuran dimana diperoleh nilai rata-rata tersebut, derajat kebebasan dari n pengamatan berulang dapat dihitung dengan:

$$v_i = n - 1 \dots\dots\dots(6)$$

Untuk pengukuran yang telah dikarakterisasi dengan baik dibawah pengendalian statistik, simpangan baku pooled s_p , dengan derajat kebebasan v_p berdasarkan M seri pengamatan terhadap variabel yang sama dapat tersedia. Simpangan baku pooled ditentukan oleh:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^M v_i}} \dots\dots\dots(7)$$

$$v_p = \sum_{i=1}^M v_i \dots\dots\dots(8)$$

Dimana, s_i adalah simpangan baku eksperimental dari satu seri m_i pengamatan berulang yang saling bebas, dan mempunyai derajat kebebasan:

$$v_i = m_i - 1 \dots\dots\dots(9)$$

Jika hasil pengukuran \bar{x} terhadap variabel yang sama ditentukan dari n pengamatan yang saling bebas, ketidakpastian baku tipe A, yaitu u dapat diestimasi dari:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(10)$$

Terdapat banyak metode untuk menentukan ketidakpastian baku tipe A, perhitungan yang paling umum adalah ESDM, evaluasi tipe A berikutnya yang paling umum adalah ketidakpastian baku dari penarikan kurva (*fitted curves*).

Sebagai contoh, bila diinginkan untuk menarik garis lurus terhadap beberapa data, garis lurus tersebut diwakili oleh persamaan :

$$y = a + bx \dots\dots\dots(11)$$

Perbedaan antara titik data aktual dan nilai terkait yang dihitung dari persamaan tersebut disebut dengan residual. Dalam proses penarikan kurva, diharapkan untuk memperoleh nilai a dan b sehingga jumlah dari kuadrat residual (SSR) tersebut minimum:

$$SSR = \sum (y_i - a - bx_i)^2 \dots\dots\dots(12)$$

Sebaran dari titik data di sekitar kurva dapat digambarkan dengan taksiran simpangan baku, yang sering disebut sebagai *standard error* dari nilai y yang dihitung dari persamaan kurva, yaitu:

$$s = \sqrt{\frac{SSR}{v}} \dots\dots\dots(13)$$

Bila v adalah jumlah derajat kebebasan, yang dapat dihitung dengan:

$v = \text{banyaknya titik data} - \text{banyaknya koefisien yang ditentukan}$ atau $v = \text{banyaknya titik data} - 2$; untuk garis lurus

Sebagaimana rata-rata dari pengukuran berulang, untuk kurva tersebut, ketidakpastian baku terkait diperoleh dari taksiran simpangan baku:

$$u = s \dots\dots\dots(14)$$

Proses penarikan kurva tidak terbatas pada garis lurus, secara umum kurva yang mewakili serangkaian data pengukuran dapat dinyatakan sebagai:

$$y = f(x) \dots\dots\dots(15)$$

Meskipun perhitungan koefisien kurva dan evaluasi ketidakpastiannya tampak sulit, banyak perangkat lunak komersial yang telah mempunyai fungsi *built in* untuk proses perhitungan penarikan kurva (regresi).

2.5. Evaluasi Ketidakpastian Baku Tipe B

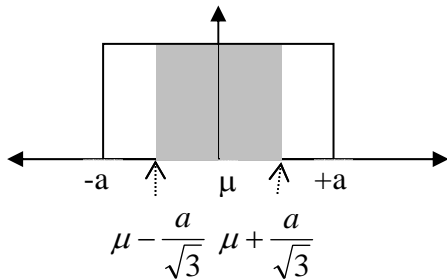
Evaluasi ketidakpastian baku tipe B diperoleh dengan cara selain analisis statistik dari serangkaian pengamatan yang biasanya didasarkan pada justifikasi ilmiah menggunakan semua informasi relevan yang tersedia, yang dapat meliputi:

- ⇒ Data pengukuran sebelumnya;
- ⇒ Pengalaman dengan, atau pengetahuan umum tentang tingkah laku dan sifat instrumen dan bahan yang relevan;
- ⇒ Spesifikasi pabrik;
- ⇒ Data yang diberikan dalam sertifikat atau laporan lainnya;
- ⇒ Ketidakpastian yang diberikan untuk data acuan yang diambil dari *data book*.

Contoh paling sederhana dari evaluasi tipe B adalah penggunaan ketidakpastian yang dilaporkan dalam sertifikat standar. Untuk memperoleh ketidakpastian baku, ketidakpastian bentangan dibagi dengan faktor cakupan yang diberikan dalam sertifikat tersebut. Tanpa adanya nilai faktor cakupan, maka faktor cakupan sama dengan 2 dapat digunakan jika ketidakpastian bentangan mempunyai tingkat kepercayaan 95%.

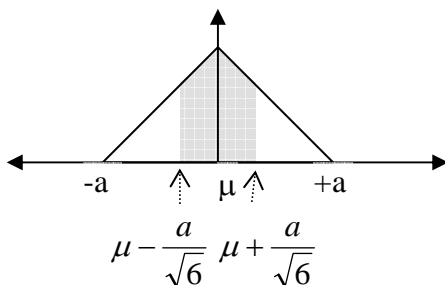
Dalam kasus lain, dimana ketidakpastian diberikan dalam batas tertentu $\pm a$, distribusi kemungkinan dapat diestimasi dari informasi yang tersedia, yang kemungkinan dapat berbentuk distribusi berikut:

- ⇒ Distribusi kemungkinan rectangular
Hal ini digunakan bila batas dapat ditentukan namun nilai besaran ukur tampak berada di semua tempat dalam rentang tersebut. Ketidakpastian baku diperoleh dengan membagi semi-range 'a' dengan $\sqrt{3}$, yaitu $u = a/\sqrt{3}$



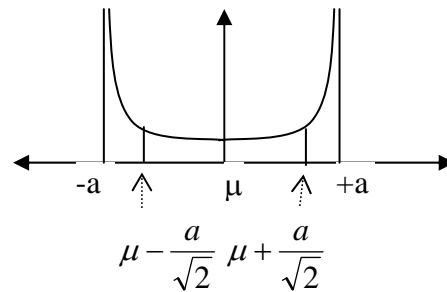
Gambar 1. Distribusi Rectangular

- ⇒ Distribusi kemungkinan triangular
Hal ini digunakan bila terdapat bukti bahwa nilai yang paling mungkin adalah nilai yang dekat dengan nilai rata-rata, lebih dekat dengan batas rentang, kemungkinannya berkurang menuju "nol". Ketidakpastian baku diperoleh dengan membagi semi-range 'a' dengan $\sqrt{6}$, yaitu, $u = a/\sqrt{6}$



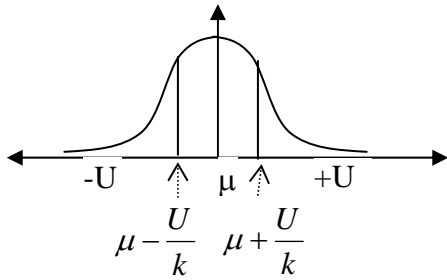
Gambar 2. Distribusi Triangular

- ⇒ Distribusi kemungkinan bentuk-U
Distribusi ini terjadi di beberapa bidang metrologi. Sebagai contoh adalah distribusi kemungkinan untuk ketidakpastian yang timbul dari refleksi konektor frekuensi radio. Hal ini juga dapat diterapkan untuk variasi temperatur udara bila kendali temperatur menghasilkan sebaran yang selalu dekat dengan batas ketidakpastian. Ketidakpastian diperoleh dengan membagi semi-range 'a' dengan $\sqrt{2}$ yaitu, $u = a/\sqrt{2}$.



Gambar 3. Distribusi U

- ⇒ Distribusi Gaussian atau Normal
Distribusi ini dapat digunakan bila diasumsikan untuk ketidakpastian yang menyatakan tingkat kepercayaan tertentu, 95% atau 99%. Ketidakpastian baku diperoleh dengan membagi ketidakpastian tersebut dengan faktor cakupan yang tepat berdasarkan tabel distribusi-t, yaitu $u = U/k$; dimana U adalah ketidakpastian bentangan untuk tingkat kepercayaan tertentu dan k adalah faktor cakupan,



Gambar 4. Distribusi Normal

Untuk evaluasi ketidakpastian baku tipe B, distribusi rectangular adalah model dasar yang cukup beralasan bila tidak terdapat informasi lainnya. Namun jika diketahui bahwa nilai besaran yang diukur dekat dengan pusat rentang ketidakpastian, maka distribusi triangular merupakan model yang lebih baik.

Ketidakpastian baku tipe B diperoleh dari suatu proses penaksiran distribusi kemungkinan. Secara sederhana diasumsikan bahwa distribusi kemungkinan dari nilai tersebut telah diketahui dengan pasti. Dalam sebagian besar kasus, dapat diasumsikan bahwa derajat kebebasan dari ketidakpastian baku tersebut adalah tak terhingga. Hal ini merupakan asumsi yang beralasan dalam praktek secara umum bahwa kemungkinan dari besaran yang diamati berada diluar batas ketidakpastian adalah sangat kecil.

2.6. Ketidakpastian Baku Gabungan

Ketidakpastian baku gabungan dari suatu pengukuran, dinotasikan dengan $u_c(y)$, diambil untuk mewakili taksiran simpangan baku (*estimated standard deviation*) dari hasil

pengukuran, yang diperoleh dengan menggabungkan ketidakpastian baku dari setiap taksiran masukan berdasarkan pendekatan deret Taylor orde satu dari model pengukuran. Metode penggabungan ketidakpastian baku ini sering disebut dengan hukum propagasi ketidakpastian.

Untuk besaran masukan yang tidak berkorelasi, ketidakpastian baku gabungan dari taksiran keluaran y dapat dinyatakan dengan:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [u_i(y)]^2} \dots\dots\dots (16)$$

dimana: $c_i = \partial f / \partial x_i$ dan $c_i u(x_i) = u_i(y)$

Dalam proses pengukuran, terdapat beberapa keadaan dimana dua besaran masukan atau lebih saling bergantung. Pernyataan ketidakpastian baku gabungan yang tepat terkait dengan hasil pengukuran tersebut adalah:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j)} \dots\dots\dots (17)$$

Ke-saling-bergantung-an dari dua variabel disifatkan oleh koefisien korelasinya, yang dapat dinyatakan sebagai:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \dots\dots\dots (18)$$

Korelasi dapat terjadi jika pengukuran yang sama digunakan lebih dari sekali dalam proses pengukuran yang sama, namun, pengaruhnya terhadap ketidakpastian baku gabungan dapat positif, yaitu menambah ketidakpastian atau negatif, yang menyebabkan pengurangan ketidakpastian.

Jika diduga terdapat korelasi positif namun koefisien korelasi tidak dapat dihitung dengan mudah, cukup beralasan untuk mengasumsikan koefisien korelasi sama dengan +1. Jika semua taksiran masukan berkorelasi dengan koefisien korelasi +1, ketidakpastian baku gabungan dari taksiran keluaran dapat dinyatakan dengan:

$$u_c(y) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^N c_i u(x_i) \right]^2} \dots\dots\dots(19)$$

Untuk penggunaan praktis dalam bidang pengujian, aturan sederhana berikut dapat digunakan untuk model pengukuran yang sering dijumpai dalam pengukuran analitik:

⇒ Jika model hanya mencakup penjumlahan atau pengurangan dari besaran yang berbeda, misalnya,

$$y = (p + q + r + \dots) \dots\dots\dots(20)$$

$$u_c(y) = \sqrt{u(p)^2 + u(q)^2 + u(r)^2 + \dots} \dots\dots(21)$$

⇒ Jika model mencakup perkalian atau pembagian besaran yang berbeda, misalnya,

$$y = p.q.r\dots \quad \text{atau} \quad y = p/(q.r\dots) \dots\dots\dots(22)$$

$$u_c(y) = y \sqrt{(u(p)/p)^2 + (u(q)/q)^2 + (u(r)/r)^2 + \dots} \dots\dots(23)$$

⇒ Jika model mencakup suatu fungsi pangkat-n, misalnya, $y = a^n$

$$u_c(y) = ny u(a) / a \dots\dots\dots(24)$$

2.7. Ketidakpastian Bentangan (Expanded Uncertainty)

Ukuran ketidakpastian perlu untuk memenuhi kemungkinan yang memadai yang diistilahkan dengan ketidakpastian bentangan, yang dinyatakan dengan simbol U , dan diperoleh dari mengalikan $u_c(y)$ dengan caktor cakupan, yang dinyatakan dengan simbol t atau k .

Praktek internasional yang biasa diterapkan adalah memberikan tingkat kepercayaan sekitar 95% (95.45%). Untuk tingkat kepercayaan tertentu, nilai faktor cakupan bervariasi terhadap derajat kebebasan efektif.

Dalam banyak kasus, nilai k sama dengan 2 dapat digunakan bila derajat kebebasan cukup besar, yaitu lebih besar atau sama dengan 30. Jika derajat kebebasan efektif relatif kecil, nilai k dapat diperoleh dari *tabel distribusi-t*.

III. METODOLOGI

Tahapan-tahapan yang dilakukan untuk menghitung ketidakpastian pengukuran dalam pengujian adalah sebagai berikut:

- ⇒ *Tentukan model matematis proses pengukuran.*
- ⇒ *Tentukan taksiran nilai besaran masukan.*
- ⇒ *Lakukan identifikasi semua sumber ketidakpastian.*
- ⇒ *Evaluasi ketidakpastian baku tipe A untuk besaran ukur yang diperoleh dari pengamatan berulang.*
- ⇒ *Evaluasi ketidakpastian baku tipe B berdasarkan informasi yang tersedia.*
- ⇒ Hitung ketidakpastian baku gabungan.
- ⇒ Hitung ketidakpastian bentangan dari hasil pengukuran.

IV. STUDI KASUS

Sebuah mesin uji tekan digunakan untuk mengetahui mutu beton dengan cara diuji tekan. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus dengan ukuran nominal 15 cm x 15 cm x 15 cm. Kuat tekan didefinisikan sebagai gaya dibagi dengan luas penampang benda uji dengan rumus sebagai berikut :

$$\sigma_k = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(24)$$

dimana :

- σ_k = kuat tekan beton (kg/cm²)
- P = gaya tekan (kg)
- A = luas penampang kubus (cm²)

Mesin uji tekan tersebut secara rutin dikalibrasi. Dari sertifikat kalibrasi diperoleh ketidakpastiannya $\pm 1,24$ % pada tingkat kepercayaan CL = 95 % serta faktor cakupan k = 2. Pembacaan mesin dengan skala analog pada range 0 – 200.000 kg dengan 2000 skala divisi. Teknisi uji telah berpengalaman dan dapat membaca skala sampai 1/10 divisi. Benda uji diukur dengan jangka sorong yang telah dikalibrasi dan pada sertifikat kalibrasi ketidakpastiannya adalah 0,02 mm dengan CL = 95 %. Teknisi uji dapat mengukur sampai $\pm 0,01$ mm. Jumlah benda uji ada 20 kubus dengan luas penampang masing-masing 225 cm² dan pecah pada beban sebagaimana tercantum pada tabel 1 kolom 3

Di dalam analisis studi kasus ini akan dilakukan perbandingan hasil pengujian kuat tekan beton dengan dan tanpa memperhitungkan estimasi ketidakpastian pengukuran.

V. ANALISIS DAN EVALUASI PEMBAHASAN

5.1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Tanpa Memperhitungkan Estimasi Ketidakpastian Pengukuran

Pengujian dilaksanakan sesuai dengan metode uji SK SNI-03-3403-

1994. Dari hasil pengujian kuat tekan kubus diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 1.
Pengujian Kuat Tekan Kubus

No.	Luas bidang tekan (cm ²)	Beban tekan (kg)	Kuat tekan (kg/cm ²)
1	225.000	55.600.000	247.111
2	225.000	61.800.000	274.667
3	225.000	65.000.000	288.889
4	225.000	63.400.000	281.778
5	225.000	73.300.000	325.778
6	225.000	68.800.000	305.778
7	225.000	61.000.000	271.111
8	225.000	62.400.000	277.333
9	225.000	56.400.000	250.667
10	225.000	60.000.000	266.667
11	225.000	65.400.000	290.667
12	225.000	66.800.000	296.889
13	225.000	55.600.000	247.111
14	225.000	53.600.000	238.222
15	225.000	52.400.000	232.889
16	225.000	51.400.000	228.444
17	225.000	61.000.000	271.111
18	225.000	61.000.000	271.111
19	225.000	65.000.000	288.889
20	225.000	56.200.000	249.778
jumlah		1,216,100.00	5,404.89

Dari hasil pengujian kuat tekan dalam tabel 1 diperoleh kuat tekan kubus rata-rata adalah :

$$\sigma_k = \frac{5404,89}{20} \frac{kg}{cm^2} = 270,24 \frac{kg}{cm^2}$$

5.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Yang Memperhitungkan Estimasi Ketidakpastian Pengukuran

Perhitungan hasil uji kuat tekan beton yang memasukkan unsur-unsur ketidakpastian dilakukan dalam tahapan sebagai berikut :

- ☞ Menetapkan model matematika untuk kuat tekan beton, seperti pada rumus (24);
- ☞ Menganalisis ketidakpastian baku tipe A sebagai berikut :

Tabel 2.
Pengujian Kuat Tekan Kubus untuk Analisis Tipe A

No	Luasbidangtekan	Bebanteakan	Kuattekan	$\sigma - \bar{\sigma}$	$(\sigma_i - \bar{\sigma})^2$
	(cm ²)	(kg)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
1	225000	55600000	247.111	-23.133	535.151
2	225000	61800000	274.667	4.422	19.556
3	225000	65000000	288.889	18.644	347.615
4	225000	63400000	281.778	11.533	133.018
5	225000	73300000	325.778	55.533	3083.951
6	225000	68800000	305.778	35.533	1262.618
7	225000	61000000	271.111	0.887	0.751
8	225000	62400000	277.333	7.099	50.292
9	225000	56400000	250.667	-19.578	383.289
10	225000	60000000	266.667	-3.578	12.800
11	225000	65400000	290.667	20.422	417.057
12	225000	66800000	296.889	26.644	709.926
13	225000	55600000	247.111	-23.133	535.151
14	225000	53600000	238.222	-32.022	1,025.423
15	225000	52400000	232.889	-37.336	1,395.488
16	225000	51400000	228.444	-41.800	1,747.240
17	225000	61000000	271.111	0.887	0.751
18	225000	61000000	271.111	0.887	0.751
19	225000	65000000	288.889	18.644	347.615
20	225000	56200000	249.778	-20.457	418.884
jumlah		1,216,100.00	5,404.89		12,427.25

Dari tabel 2 dapat dihitung :

Beban rata-rata = 60,805 kg
 Kuat tekan rata-rata = 270,24 kg/cm²

$$SD = \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{(x_k - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots(25)$$

Standar deviasi (SD) = 25,575 kg/cm²

$$ESDM = s(\bar{x}) = \frac{SD}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(26)$$

Sebaran rata-rata simpangan baku eksperimental (ESDM) = 5,719 kg/cm² atau 2,116 %.

☞ Menganalisis ketidakpastian baku tipe B sebagai berikut :

Dari sertifikat kalibrasi alat diperoleh :

Ketidakpastian mesin U = 1,24 %
 Tingkat kepercayaan CL= 95 %
 Faktor cakupan k = 2

$$\mu_{1(MUT)} = \frac{U}{k} \dots\dots\dots(27)$$

Nilai ketidakpastian UTM dihitung dengan rumus (27) :

$$\mu_{1(MUT)} = 0,62 \%$$

Ketidakpastian teknisi dalam mengukur luas benda uji :

Ketidakpastian jangka sorong memiliki nilai ketidakpastiannya sebesar 0,001 mm dengan CL adalah 95 %. Teknisi uji dapat mengukur dengan ketelitian ± 0,01 mm

$$\mu_{(js)} = \frac{U}{k} = 0,0005 \dots\dots\dots(28)$$

$$\mu_{teknisi} = \frac{U}{k} = 0,005 \dots\dots\dots(29)$$

$$\mu_{2(luas)} = \sqrt{\mu_{(js)}^2 + \mu_{teknisi}^2} \dots\dots(30)$$

Panjang sisi kubus = 150 mm.
 $\mu_{2(luas)} = 0,011$ mm atau 0,007 %

Ketidakpastian teknisi dalam membaca mesin uji tekan μ_3 :

Pembacaan mesin dengan skala analog pada range 0 – 200.000 kg, dengan 2000 skala divisi. Teknisi uji telah berpengalaman dan dapat membaca skala sampai dengan 0,1 divisi.

Satu skala divisi = 100 kg
 1/10 skala divisi = 10 kg
 Faktor cakupan k = 2

$$\mu_3 = \frac{U}{k} = 5 \text{ kg} \dots\dots\dots(31)$$

Untuk skala interval (SI) > 2,25 mm :

$$\mu_3 = \frac{\frac{1}{10} \times \text{divisi}}{\sqrt{3}} = 5,774 \text{ Kg} \dots\dots(32)$$

Beban tekan rata-rata tanpa memperhatikan U = 60805,000 kg.
 Beban tekan rata-rata dengan memperhatikan U = 60810,774 kg.
 Variasi pembacaan teknisi = 0,009%

☞ Menganalisis estimasi ketidakpastian gabungan tipe A dan tipe B :

$$\mu_c = \sqrt{\left(s\left(\bar{x}\right)\right)^2 + \left(\mu_1\right)^2 + \left(\mu_2\right)^2 + \left(\mu_3\right)^2} \dots\dots(33)$$

Ketidakpastian gabungan $\mu_c = 2,205$ % sehingga didapat ketidakpastian yang diperluas sebesar k $\mu_c = 4,410$ %. Besarnya ketidakpastian dari hasil uji tekan beton kubus adalah ± 0,04410 x 270,24 kg/cm² = ±

11,92 kg/cm². Nilai toleransi ketidakpastian untuk uji tekan beton tidak boleh melebihi 5 % dari kuat tekan beton rata-rata. Toleransi nilai ketidakpastian = 5 % x 270,24 kg/cm² = 13,512 kg/cm². Sehingga nilai ketidakpastian sebesar 11,92 kg/cm² memenuhi persyaratan.

Maka besarnya nilai kuat tekan beton adalah :

$$\mu_k = (270,24 \pm 11,92) \text{ kg/cm}^2.$$

Berarti nilai sebenarnya hasil kuat tekan beton kubus tersebut berada dalam rentang **258,32 kg/cm²** dan **282,16 kg/cm²**.

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Estimasi ketidakpastian pengukuran dalam pengujian, khususnya di laboratorium dipengaruhi oleh beberapa komponen yang bergantung pada sejumlah faktor yang diperlukan oleh laboratorium untuk menunjukkan kompetensi laboratorium penguji, yang antara lain meliputi :

- ⇒ Pendidikan, pelatihan dan pengetahuan teknis personel;
- ⇒ Kondisi lingkungan laboratorium penguji;
- ⇒ Pemeliharaan peralatan, termasuk interval kalibrasi dan verifikasi.

Untuk dapat memberikan hasil pengukuran yang baik, maka

pengamatan terhadap kondisi laboratorium harus dilakukan dengan memperhatikan:

- ⇒ Metode kalibrasi
Metode kalibrasi akan mempengaruhi tingkat ketelitian dalam pengujian karena dalam metode biasanya dinyatakan spesifikasi peralatan yang dapat dikalibrasi berdasarkan metode tersebut, persyaratan kondisi lingkungan, kalibrator yang digunakan, dan skema pengamatan
- ⇒ Standar acuan dan alat ukur
Ada satu hal yang perlu diperhatikan, nilai yang tercantum dalam sertifikat kalibrasi merupakan nilai yang valid pada saat standar acuan atau alat ukur tersebut dikalibrasi. Dalam kondisi rutin, maka pergeseran nilai dari standar acuan dan alat ukur tersebut dapat diperkirakan dari riwayat peralatan.
- ⇒ Peralatan bantu
Dalam proses kalibrasi, jenis dan akurasi alat bantu yang digunakan untuk memonitor besaran akan mempengaruhi ketelitian yang diberikan.
- ⇒ Teknik pengukuran
Teknik pengukuran yang berbeda akan menyebabkan nilai ketelitian yang diberikan berbeda pula.
- ⇒ Personil
Personil yang melakukan proses kalibrasi akan memberikan kontribusi yang cukup berarti dalam evaluasi ketidakpastian.

6.2. Saran

Pengujian yang dilakukan di laboratorium sebaiknya memperhitungkan faktor ketidakpastiannya agar hasil pengujian yang dilakukan memiliki nilai keakuratan yang tepat dan dapat diterima di seluruh dunia.

DAFTAR PUSTAKA

1. APLAC TC 004, *Method of Stating Test Results and Compliance with Specification*, 2001
2. Cook, R R, Giardini, W J, *Guide to the ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, CSIRO-NML 1993
3. Cook, R R, *Assessment of Uncertainty of Measurement for Calibration and Testing Laboratories*, 1998
4. EA-4/02 *Expression of The Uncertainty of Measurement in Calibration*, European Accreditation, 1999
5. *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 1993
6. *ISO Guide to The Expression of Uncertainty in Measurement*, 1993, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
7. *ISO/IEC 17025 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration laboratories*, first edition, 1999
8. EURACHEM/CITAC Guide *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*, 2000
9. Kisset, D, *Best Measurement Capability*, OIML Bulletin, July 1999
10. Laporan hasil pengujian kuat tekan beton Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan
11. SAC-SINGLAS Technical Guide 2, *Guidelines of The Evaluation and Expression of Uncertainty in Chemical Analysis*, 1st edition, 2000
12. SAC-SINGLAS Technical Guide 1, *Guidelines of The Evaluation and Expression of Measurement Uncertainty*, 2nd edition, 2001
13. Sertifikasi kalibrasi alat UTM
14. SNI-19-17025-2000 *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Penguji dan Kalibrasi*, 2000
15. Taylor, B N, Kuyatt, C E, *Guideline for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, NIST Technical Note 1297, 1993

Penulis :

N. Retno Setiati, ST., MT

Calon Peneliti Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, Badan Litbang Departemen Pekerjaan Umum.