
EVALUASI KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN PENGUJIAN MEKANIS PADA BAJA TULANGAN BETON SIRIP SNI 2052:2017

Evaluation of Mechanical Measurement Uncertainty on SNI 2052:2017 Steel Deformed Bar

Riki Efendi¹, Mislan²

¹Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, Jl. Meruya Selatan, Kebon Jeruk - Jakarta Barat, DKI Jakarta 10650

²Departemen Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Bina Bangsa, Jl. Raya Serang – Jakarta, KM 03 No. 1B, Penancangan, Cipocok Jaya, Kota Serang, Banten 42124

e-mail: effendi.riki@gmail.com

Diterima: 20 Februari 2023, Direvisi: 03 Maret 2023, Disetujui: 03 Oktober 2023

Abstrak

Baja Tulangan Beton sebagai material penting yang digunakan untuk konstruksi di Indonesia membutuhkan ketelitian dalam penentuan spesifikasi mekanisnya sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi spesifikasi mekanis tersebut seperti ketidakpastian pengukuran. Penelitian ini mengevaluasi ketidakpastian pengukuran baja tulangan beton dengan parameter kuat luluh, kuat tarik, dan regangan sesuai SNI 2052:2017. Pengujian mekanis dilakukan berdasarkan SNI 8389:2017 menggunakan 10 sampel berukuran nominal 10 mm hingga 32 mm dan diuji di Laboratorium Pengujian PT Putra Baja Deli yang telah terakreditasi oleh Komite Akreditasi Nasional sesuai SNI ISO/IEC 17025:2017. Ketidakpastian pengukuran yang dievaluasi adalah ketidakpastian pengujian sampel, kalibrasi dan resolusi alat. Hasil evaluasi ketidakpastian pengukuran diperluas parameter kuat luluh dan kuat tarik bervariasi untuk setiap ukuran sampel, namun kuat tarik memiliki variasi yang lebih kecil dibandingkan kuat luluh. Nilai kontribusi ketidakpastian terbesar berasal dari ketidakpastian pengujian sampel. Pada parameter regangan, ketidakpastian diperluas menghasilkan nilai yang lebih kecil dari 1% dengan nilai kontribusi ketidakpastian terbesar diberikan oleh ketidakpastian pengujian panjang akhir sampel. Hasil evaluasi dapat menjadi informasi penting untuk kriteria keberterimaan dalam menentukan spesifikasi mekanis produk baja tulangan beton sirip dan evaluasi terkait dengan prosedur pengujian mekanis baja tulangan beton sirip.

Kata kunci: Baja Tulangan Beton Sirip, Ketidakpastian Pengukuran, SNI 2052:2017, pengujian mekanis.

Abstract

Steel deformed bar, an important material used for construction in Indonesia, requires sufficiently high accuracy in determining its mechanical specifications. Therefore, it is necessary to evaluate the factors that affect these mechanical specifications, such as measurement uncertainty. This research evaluated the measurement uncertainty of steel deformed bars using yield strength, tensile strength, and elongation according to SNI 2052:2017. Mechanical test was carried out based on SNI 8389:2017 using 10 samples of nominal size 10 mm to 32 mm and tested at PT Putra Baja Deli Testing Laboratory, which has been accredited by the National Accreditation Body (KAN) according to SNI ISO/IEC 17025:2017. The evaluation measurement of yield and tensile strength uncertainty resulted in an expanded uncertainty value that varied for each sample size, where variation in value for tensile strength has smaller than yield strength. The largest uncertainty contribution value comes from the uncertainty of sample. In elongation, the expanded uncertainty produced values smaller than 1%, with the largest uncertainty was contributed by final length of sample test uncertainty. The evaluation results can be important information for acceptance criteria in determining the mechanical specifications of steel deformed bar product and evaluation related to testing procedure.

Keywords: Steel Deformed Bar, Measurement Uncertainty, SNI 2052:2017, Mechanical Testing

1. PENDAHULUAN

Baja tulangan beton di Indonesia merupakan produk yang wajib menerapkan SNI, sebagaimana tertuang dalam Peraturan Menteri

Perindustrian No.14 Tahun 2014 *Tentang Pemberlakuan SNI Baja Tulangan Beton Secara Wajib* (Indonesia). Penggunaan baja tulangan beton sirip untuk konstruksi seperti gedung bertingkat, jembatan, jalan, pelabuhan, bandara, dan aplikasi lainnya memerlukan kehandalan

mutu dan kesesuaian spesifikasi sesuai standar yang berlaku (Allen & Iano, 2009; Ede et al., 2018; Ede et al., 2015). Salah satu standar untuk konstruksi adalah SNI 2052:2017 (Badan Standardisasi Nasional, 2017b) yang mengatur spesifikasi mutu mekanis baja tulangan beton sirip seperti kuat tarik, kuat leleh, regangan dan rasio perbandingan kuat tarik dan kuat leleh (T_s/Y_s).

Penetapan kesesuaian spesifikasi mutu baja tulangan beton tidak terlepas dari evaluasi ketidakpastian pengukuran yang ditetapkan melalui aturan keputusan (Badan Standardisasi Nasional, 2018), khususnya bagi laboratorium pengujian yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025:2017 sebagai sistem manajemen laboratoriumnya. Saat ini, pengujian mutu oleh laboratorium pengujian terakreditasi semakin diminati karena dinilai mampu memberikan kepercayaan terhadap hasil uji (Abdel-Fatah, H. T.M, 2010), kemamputelusuran yang baik (Miguel et al., 2021), dan adanya skema saling pengakuan hasil uji (International Laboratory Accreditation Cooperation, 2015). Selain itu, dengan adanya akreditasi, maka sistem manajemen yang diterapkan seperti SNI ISO/IEC 17025:2017 secara berkala dipantau kesesuaiannya oleh lembaga akreditasi seperti Komite Akreditasi Nasional (KAN) sesuai dengan Undang-Undang Republik Indonesia No. 20

Tahun 2014 *Tentang Standardisasi dan Penilaian Kesesuaian* (Indonesia).

Dalam tahapan evaluasi ketidakpastian pengukuran, suatu laboratorium harus mengidentifikasi kontribusi ketidakpastian yang dinilai signifikan dari proses pengujian, lalu dianalisa menggunakan metode yang tepat. Hasil evaluasi tersebut akan memberikan informasi terkait sebaran nilai benar sehingga dapat digunakan sebagai acuan penilaian kesesuaian produk (Faridah et al., 2018). Evaluasi ketidakpastian pengukuran untuk baja tulangan beton telah diwujudkan dalam beberapa standar pengujian logam internasional seperti AS 1391 dan ISO 6892-1, namun hal ini belum diterapkan pada standar pengujian logam untuk Indonesia (Badan Standardisasi Nasional, 2017a). Oleh karenanya, mengidentifikasi dan mengevaluasi kontribusi ketidakpastian pengukuran dengan tepat dapat menjadi kontrol mutu yang handal dalam menunjukkan jaminan hasil uji yang lebih baik, sehingga saat produk tersebut diaplikasikan dapat meningkatkan ketahanan, keamanan, dan keselamatan (Kumar et al., 2022).

Beberapa penelitian telah melakukan evaluasi ketidakpastian pengukuran terhadap baja tulangan beton dengan berbagai indikator dan pengaruhnya terhadap mutu. Tabel 1 menunjukkan penelitian terdahulu terkait evaluasi ketidakpastian pengukuran pada baja tulangan beton.

Tabel 1 Kontribusi ketidakpastian pengukuran mekanis.

Sumber	Sumber Ketidakpastian Pengukuran	Parameter Uji	Material
Kumar et al., 2022	<i>Calibration, resolution, sample preparation, homogeneity, repeatability of sample</i>	<i>0.2% proof stress, ultimate tensile strength, elongation</i>	<i>Fe 550D TMT bar</i>
Suhartono, 2022	<i>Calibrated device, resolution, force</i>	<i>Yield strength, tensile strength</i>	<i>Deformed steel bars for concrete reinforcement</i>
Aravinna, 2021	<i>Calibration, resolution, repeatability of reading, dimensional variation, force</i>	<i>Tensile strength</i>	<i>Reinforcement steel bar</i>
Dhoska et al., 2022	<i>Calibration, sample centering, caliper resolution, force, diameter dimensional variation</i>	<i>Tensile strength</i>	<i>HRB400 reinforcement steel bar</i>
Penelitian sekarang	<i>Standard deviation of sample, calibration, resolution</i>	<i>Yield strength, tensile strength, elongation</i>	Baja tulangan beton sirip 420B

SNI 2052:2017 mensyaratkan berbagai parameter uji untuk menentukan sifat mekanis, salah satunya adalah regangan. Namun dalam penelitian terdahulu, parameter regangan masih

belum banyak diperhatikan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan hal tersebut, maka pada penelitian ini evaluasi ketidakpastian pengukuran mekanis baja tulangan

beton melibatkan parameter regangan selain parameter kuat luluh dan kuat tarik. Sehingga, hasil evaluasi ketidakpastian pengukuran mekanis pada penelitian ini dapat menjadi gambaran yang lebih lengkap terhadap penetapan mutu baja tulangan beton SNI 2052:2017.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Baja Tulangan Beton diartikan sebagai baja karbon atau baja paduan yang berbentuk batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip/ulir dan digunakan untuk penulangan beton. Baja ini diproduksi dari bahan baku billet dengan cara canai panas (*hot rolling*). Baja tulangan beton berdasarkan bentuk permukaannya dibagi atas baja tulangan beton polos (BjTP) dan baja tulangan beton sirip (BjTS) (Badan Standardisasi Nasional, 2017b).

Penggunaan baja tulangan beton sebagai bahan konstruksi dapat meningkatkan ketahanan beton akan kompresi, tekanan, gaya geser, dan efek penekukan (Allen & Iano, 2009; Trivedi et al., 2018). Selain itu, baja tulangan beton dengan penambahan sirip akan meningkatkan daya lekat batang baja tulangan terhadap beton dan membantu menahan gerakan membujur dari batang baja tulangan secara relatif terhadap beton (Badan Standardisasi Nasional, 2017b). Keunggulan ini memberikan peningkatan ketahanan, keamanan, dan keselamatan pada bangunan yang dikonstruksi (Daniyal & Akhtar, 2020; Kumar et al., 2022), yang mana faktor-faktor tersebut menjadi salah satu pertimbangan diwajibkannya SNI 2052:2017 dalam produksi baja tulangan beton seperti tertuang dalam Peraturan Menteri Perindustrian No.14 Tahun 2018 *Tentang Pemberlakuan SNI Baja Tulangan Beton Secara Wajib* (Indonesia).

Salah satu persyaratan mutu yang diperhatikan dalam aplikasi baja tulangan beton sirip adalah mutu mekanis, yaitu kuat luluh, kuat tarik, regangan, dan rasio T_s/Y_s (Badan Standardisasi Nasional, 2019; Firat, 2016). Untuk menilai kesesuaian mutu yang diinginkan, sesuai Peraturan Menteri Perindustrian No.14 Tahun 2018 *Tentang Pemberlakuan SNI Baja Tulangan Beton Secara Wajib* (Indonesia), pengujian mutu produk dilakukan melalui laboratorium yang diakreditasi KAN sesuai ruang lingkup SNI. Untuk mendapatkan akreditasi KAN, laboratorium pengujian mekanik harus menerapkan sistem

manajemen laboratorium sesuai SNI ISO/IEC 17025:2017 yang berisi persyaratan-persyaratan sebagai laboratorium pengujian berkompeten. Menurut (Tawfik & Fatah, 2010), akreditasi SNI ISO/IEC 17025 sebagai sistem manajemen dapat meningkatkan kepedulian terhadap mutu, meningkatkan kompetensi teknis, dan meningkatkan kepercayaan terhadap hasil uji.

Salah satu pemenuhan persyaratan dalam SNI ISO/IEC 17025:2017 adalah adanya evaluasi terhadap ketidakpastian pengukuran. Laboratorium diharuskan mengidentifikasi kontribusi terhadap ketidakpastian pengukuran dengan menggunakan metode analisis yang tepat, dan jika tidak memungkinkan dapat mengestimasi dengan memanfaatkan prinsip-prinsip teoritis atau pengalaman praktis sesuai metode pengujiannya (Badan Standardisasi Nasional, 2018).

Ketidakpastian pengukuran *dalam Guide to the expression of uncertainty measurement (GUM)* diartikan sebagai parameter, terkait dengan hasil pengukuran, yang mencirikan penyebaran nilai yang secara wajar dapat dikaitkan dengan besaran ukur (*measurand*). Contoh besaran ukur dalam pengujian mekanis baja tulangan adalah kuat tarik, kuat luluh, dan regangan. (*Joint Committee For Guides In Metrology*, 2008). Penerapan ketidakpastian pengukuran dalam kegiatan pengujian laboratorium berperan penting karena memberikan implikasi penerimaan dan penolakan produk karena dinilai tidak sesuai spesifikasi dan aturan keputusan yang ditetapkan (Faridah et al., 2018).

Terdapat 2 jenis evaluasi ketidakpastian pengukuran, yaitu evaluasi ketidakpastian tipe A dan evaluasi ketidakpastian tipe B. Evaluasi ketidakpastian tipe A didasarkan pada standar deviasi dari pengukuran berulang. Sedangkan evaluasi ketidakpastian tipe B berasal dari ketidakpastian selain dari ketidakpastian tipe A, dimana dapat bersumber dari justifikasi ilmiah seperti sertifikat standar acuan, sertifikat kalibrasi alat ukur, spesifikasi peralatan, dan data berat molekul (Hadi, 2018).

3. METODE PENELITIAN

Evaluasi ketidakpastian pengukuran melibatkan parameter mekanis sesuai dengan persyaratan standar baja tulangan beton Indonesia yaitu kuat

tarik, kuat luluh, dan regangan (Badan Standardisasi Nasional, 2017b). Sampel baja tulangan beton sirip berbahan baku billet *blast furnace* dengan nomor leburan yang sama, diproses dengan cara canai panas dan proses *quenching*.

Pengujian dilakukan di Laboratorium Pengujian PT Putra Baja Deli (LP-1085-IDN) berstatus akreditasi SNI ISO/IEC 17025:2017 oleh Komite Akreditasi Nasional sesuai ruang lingkup yang diuji (Komite Akreditasi Nasional, n.d). Sampel berukuran nominal 10, 13, 16, 19, 22, 25, dan 32 mm dengan kelas baja BjTS 420B di uji tarik menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas hingga 1000 kN yang terkalibrasi secara rutin dan berada dikelas verifikasi minimal A. Pengujian tarik dilakukan sesuai dengan SNI 8389:2017 dengan jumlah sampel (n) masing-masing ukuran adalah 10 sampel dengan tujuan akurasi yang lebih baik. Pengukuran terkait regangan menggunakan *vernier caliper* yang juga terkalibrasi rutin dan terverifikasi standar.

Joint Committee for Guides in Measurement (2008) menyebutkan bahwa prosedur untuk evaluasi ketidakpastian pengukuran dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut:

1. Menentukan besaran ukur (*measurand*) dan model matematis dari besaran ukur tersebut. Hubungan antara besaran ukur (Y) dan input besaran ke-1 hingga ke N (X) dinyatakan sebagai berikut:

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

Dengan *f* menyatakan gambaran prosedur pengukuran yang digunakan serta metode evaluasinya.

2. Mengidentifikasi sumber-sumber ketidakpastian pengukuran yang dapat berasal dari analisa statistik dari serangkaian pengamatan (Ketidakpastian Tipe A) seperti ketidakpastian keterulangan, simpangan baku, dsb dan sumber-sumber selain analisa statistik (Ketidakpastian Tipe B) seperti nilai sertifikat kalibrasi, nilai referensi ilmiah, dsb.
3. Mengukur besaran nilai dari sumber ketidakpastian pengukuran yang telah ditetapkan sebelumnya. Pengukuran dapat menggunakan prinsip-prinsip teoritis atau pengalaman praktis dari kinerja metode tersebut.
4. Menentukan ketidakpastian pengukuran gabungan dari pengukuran terhadap besaran ukur Y menggunakan persamaan:

$$Y u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

Dimana:

$u_c^2(y)$: Menyatakan kuadrat varians gabungan yang terkait dengan output y.

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$: Menyatakan turunan parsial sehubungan dengan kuantitas input X_i dari hubungan fungsional *f* antara besaran ukur Y dan input kuantitas X_i .

$u^2(x_i)$: Kuadrat estimasi varians yang terkait dengan estimasi input x_i yang mengestimasi kuantitas input X_i .

5. Menetapkan Ketidakpastian pengukuran yang diperluas (U) jika diperlukan dengan menggunakan persamaan:

$$U = k u_c(y) \quad (3)$$

Dimana $u_c(y)$ merupakan ketidakpastian baku gabungan dari estimasi output y dan k merupakan koefisien ekspansi. Penentuan nilai k tergantung dari tingkat kepercayaan yang dipilih. Biasanya nilai k berkisar antara 2 hingga 3. Nilai k juga dapat ditentukan melalui penggunaan derajat kebebasan efektif (v_{eff}) dari persamaan Welch-Satterthwaite (*Joint Committee For Guides In Metrology, 2008*):

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (4)$$

Dimana:

$u_c^4(y)$: Menyatakan pangkat 4 dari varians gabungan yang terkait dengan output y.

$u_i^4(y)$: Menyatakan pangkat 4 komponen ketidakpastian baku gabungan $u_c(y)$ dari estimasi keluaran y yang dihasilkan oleh ketidakpastian baku dari estimasi masukan x_i .

v_i : Derajat kebebasan, atau derajat kebebasan efektif, dari ketidakpastian baku $u(x_i)$ dari input estimasi x_i .

6. Menuliskan hasil pengukuran Y dan evaluasi ketidakpastian (ketidakpastian gabungan atau ketidakpastian diperluas) yang disertai dengan deskripsi-deskripsi seperti nilai k , tingkat kepercayaan, atau derajat kebebasan.

3.1 Statistik Hasil Uji

Analisa ketidakpastian pengukuran dilakukan pada parameter kuat luluh (MPa), kuat tarik (MPa), dan regangan (%). Hasil uji parameter dirangkum secara statistik berupa nilai rata-rata (\bar{x}), standar deviasi (STDV), *range* (R), dan persentase *coefficient of variation* (CV) sesuai dengan persamaan statistik oleh Teddy dkk (2023).

3.2 Kontribusi Ketidakpastian Pengukuran

Kontribusi ketidakpastian pengukuran dirinci pada Tabel 2.

Tabel 2 Kontribusi ketidakpastian pengukuran mekanis.

Parameter	Sumber Ketidakpastian	Tipe
Kuat Luluh dan Kuat Tarik	Ketidakpastian Pengujian Sampel	A
	Ketidakpastian Kalibrasi UTM	B
	Ketidakpastian Resolusi UTM	B
Regangan	Ketidakpastian Pengujian Panjang Akhir Sampel	A
	Ketidakpastian Kalibrasi Vernier Caliper	B
	Ketidakpastian Resolusi Vernier Caliper	B

Meskipun diameter terlibat dalam perhitungan kuat tarik dan kuat luluh, namun SNI 2052:2017 menggunakan diameter nominal, yaitu diameter yang digunakan berupa diameter yang ditetapkan dalam standar bukan dari hasil pengukuran dan tercetak timbul pada permukaan produk (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2017b). Dengan ini, sumber ketidakpastian untuk diameter diabaikan.

3.3 Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran Kuat Tarik dan Kuat Luluh

Ketidakpastian baku (*standard uncertainty*) pengukuran kuat luluh dan kuat tarik diturunkan menggunakan persamaan (2) dengan rumus sebagai berikut:

$$u_c(\sigma) = \sqrt{(c_A u_A)^2 + (c_{B1} u_{B1})^2 + (c_{B2} u_{B2})^2} \quad (5)$$

dengan derajat kebebasan efektif diturunkan dari Persamaan (4) dengan rumus sebagai berikut:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(\sigma)}{\frac{(c_A u_A)^4}{v_A} + \frac{(c_{B1} u_{B1})^4}{v_{B1}} + \frac{(c_{B2} u_{B2})^4}{v_{B2}}} \quad (6)$$

Ketidakpastian pengujian sampel ($u_A(F)$) sebanyak n sampel dinyatakan dengan persamaan:

$$u_A(F) = \sqrt{\frac{\sum(F - \bar{F})^2}{(n - 1)}} \quad (7)$$

Dimana:

- $u_c(\sigma)$: Menyatakan ketidakpastian baku pengukuran kuat tarik/luluh.
- c : Koefisien sensitifitas tipe ketidakpastian yang diperhitungkan.
- v_{eff} : Derajat kebebasan efektif dari parameter yang diukur.
- v_A : Derajat kebebasan (umum) dari suatu tipe ketidakpastian yang diperhitungkan.

Menurut (Hogan, 2017), distribusi data pengujian sampel bersifat distribusi normal 1s sedangkan derajat kebebasan gaya adalah $v_A(F) = n - 1$ (Suhartono & Rustianto, 2022).

Perhitungan ketidakpastian kalibrasi UTM $u_{B1}(F)$, melibatkan ketidakpastian gaya dari sertifikat (U_{Cert}) dan nilai k dari sertifikat kalibrasi (k_{Cert}) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$u_{B1}(F) = \frac{U_{Cert} \times \bar{F}}{k_{Cert}} \quad (8)$$

dengan derajat kebebasan $v_{B1}(F) = \infty$. (Suhartono & Rustianto, 2022) dan tipe distribusi normal 2s (Hogan, 2017).

Ketidakpastian resolusi UTM, $u_{B2}(F)$, dihitung dari skala resolusi UTM (R) dengan persamaan:

$$u_{B2}(F) = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (9)$$

dengan derajat kebebasan $v_{B2}(F) = \infty$. (Suhartono & Rustianto, 2022) dan distribusi data *rectangular* (Hogan, 2017).

Sesuai dengan ketentuan dalam JCGM 100:2008, digunakan koefisien sensitifitas (c) jika sumber ketidakpastian berbeda satuan dengan parameter yang diinginkan. Dengan demikian:

$$c = \frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{4}{\pi d^2} \quad (10)$$

Ketidakpastian diperluas dari kuat tarik dan kuat luluh dihitung dengan persamaan:

$$U_{exp}(\sigma) = k_{exp} \times u_c(\sigma) \quad (11)$$

dengan nilai k_{exp} ditentukan dengan persamaan:

$$k_{exp} = \frac{(n + 1 - v_{eff})t_{(1+p)/2}(n) + (v_{eff} - n)t_{(1+p)/2}(n + 1)}{(n + 1)} \quad (12)$$

Dimana:

- k_{exp} : Koefisien ekspansi
- n : Bilangan bulat dari v_{eff}
- $t_{(1+p)/2}(n)$: nilai t-student pada derajat kebebasan n dan level kepercayaan p.
- $t_{(1+p)/2}(n+1)$: nilai t-student pada derajat kebebasan (n+1) dan level kepercayaan p

(Aravinna, 2021)

3.4 Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran Regangan

Ketidakpastian baku pengukuran regangan ($u_c(E)$), derajat kebebasan efektif (v_{eff}), ketidakpastian pengukuran panjang akhir sampel ($u_A(L)$) untuk parameter regangan dievaluasi menggunakan prinsip yang sama pada persamaan (5) hingga (6). Sedangkan perhitungan ketidakpastian kalibrasi ($u_{B1}(L)$) dan ketidakpastian resolusi *vernier caliper* ($u_{B2}(L)$) menggunakan persamaan (8) dan (9) (Joint Committee For Guides In Metrology, 2008).

Koefisien sensitifitas (c) untuk parameter regangan (E) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$c_A = \frac{\partial E}{\partial L} = \frac{\partial (L - L_0)}{\partial L} = \frac{1}{L_0} \quad (13)$$

$$c_{B1} = c_{B2} = \frac{\partial E}{\partial L_0} = \frac{\partial (L - L_0)}{\partial L_0} = -\frac{L}{L_0^2} \quad (14)$$

Dimana L_0 merupakan panjang pengukuran awal dan L panjang sampel setelah putus. (Joint Committee For Guides In Metrology, 2008).

Ketidakpastian diperluas regangan sampel $U_{exp}(E)$ dan nilai k_{exp} dihitung menggunakan persamaan (11) dan (12).

3.5 Persentase Kontribusi Ketidakpastian Pengukuran

Persentase kontribusi ketidakpastian pengukuran dihitung menggunakan turunan ANOVA (Hogan, 2017) dengan persamaan:

$$\%Significant = \frac{u_{(x_i)}^2}{\sum_{i=1}^n u_{(x_i)}^2} \quad (15)$$

dimana $u_{(x_i)}$ merupakan ketidakpastian baku dari masing-masing sumber ketidakpastian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Statistik Pengujian Sampel

Hasil uji gaya luluh, gaya tarik, dan regangan 10 sampel baja tulangan beton sirip dirangkum pada Tabel 3 hingga Tabel 5.

Tabel 3 Rangkuman statistik hasil uji gaya luluh.

Ø (mm)	\bar{F}_y (kN)	STDV	Range (kN)	CV (%)
10	35.49	0.38	1.26	1.07
13	65.62	0.70	2.06	1.06
16	94.04	0.60	1.72	0.64
19	123.80	0.92	2.40	0.74
22	172.74	1.45	4.30	0.84
25	234.94	0.78	2.20	0.33
29	316.08	1.66	5.00	0.53
32	369.82	1.55	5.50	0.42

Tabel 4 Rangkuman statistik hasil uji gaya tarik.

\emptyset (mm)	\bar{F}_t (kN)	STDV	Range (kN)	CV (%)
10	47.44	0.29	1.02	0.62
13	84.29	0.60	1.58	0.71
16	123.84	0.39	1.40	0.32
19	165.50	0.66	2.00	0.40
22	228.11	0.48	1.50	0.21
25	311.51	0.33	1.10	0.11
29	425.70	0.89	2.60	0.21
32	495.50	0.91	2.90	0.18

Pada Tabel 3 dan Tabel 4, nilai CV gaya tarik lebih kecil dibandingkan dengan nilai CV gaya luluh disetiap ukurannya, sehingga dapat disimpulkan bahwa gaya tarik memiliki variabilitas yang lebih kecil. Menurut (Achamyeleh et al., 2022), variabilitas mekanis produk baja tulangan beton dapat digunakan untuk menilai homogenitasnya. Semakin tinggi variabilitas, semakin rendah homogenitas sampel (Agesti & Franklin, 2013). Selain itu, analisa variabilitas mekanis baja tulangan dapat menunjukkan viabilitas mekanis dan keamanan strukturnya jika diaplikasikan (Djavanroodi & Salman, 2017).

Tabel 5 Rangkuman statistik hasil uji regangan.

\emptyset (mm)	\bar{E} (%)	STDV	Range (%)	CV (%)
10	17.3	0.79	2.2	4.55
13	15.6	0.92	3.2	5.91
16	18.9	0.44	1.4	2.31
19	18.3	0.28	0.8	1.52
22	20.7	0.97	3.0	4.68
25	20.6	0.81	2.4	3.95
29	16.9	0.35	1.0	2.05
32	19.4	0.57	2.0	2.93

Data hasil uji regangan pada Tabel 5 menunjukkan nilai CV yang bervariasi. Nilai CV regangan tertinggi terdapat pada sampel ukuran 13 mm dengan nilai 5.91%. Untuk rentang regangan, ukuran 19 mm memiliki rentang nilai regangan minimum dan maksimum yang paling kecil dibandingkan ukuran lain. Sedangkan hasil ukur rata-rata regangan, terbentang pada 15.6%

hingga 20.6%. Hasil CV regangan ini berdasarkan SNI 2847 dan ACI 318 menunjukkan hasil yang baik yaitu dibawah 10%.

4.2 Ketidakpastian Pengujian Sampel

Perhitungan ketidakpastian pengujian sampel menggunakan persamaan (7), (10), (13), dan (14) untuk tiap parameter. Ketidakpastian dari perulangan pengujian sampel memiliki nilai derajat efektif (v_A) sebesar 9. Ketidakpastian pengujian sampel masing-masing parameter disajikan Tabel 5 berikut.

Tabel 6 Rangkuman ketidakpastian pengujian Sampel.

\emptyset (mm)	$u_A(\sigma_y)$ (MPa)	$u_A(\sigma_t)$ (MPa)	$u_A(E)$ (%)
10	1.53	1.18	0.25
13	1.66	1.42	0.31
16	0.95	0.62	0.14
19	1.03	0.73	0.08
22	1.21	0.40	0.31
25	0.51	0.21	0.25
29	0.80	0.43	0.11
32	0.61	0.61	0.18

Tabel 6 menunjukkan bahwa ketidakpastian tipe A masing-masing parameter bervariasi untuk setiap diameter. Pada gaya luluh, nilai ketidakpastian pengujian sampel terbesar adalah diameter 13 mm (1.66 MPa) sedangkan pada gaya tarik, nilai terbesar ada pada diameter 13 mm (1.42 MPa), dan diameter 13 dan 19 mm pada (0.31%) untuk parameter regangan. Pada regangan, nilai ketidakpastian pengujian sampel seluruh diameter dibawah 0.5%. Menurut Suhartono dan Rustianto (2022), ketidakpastian tipe A menghasilkan nilai ketidakpastian pengukuran terbesar untuk baja tulangan beton. Hal ini disebabkan karena sampel yang bersifat dekstrutif, kebutuhan perulangan uji, dan sifat alami bahan dari sampel uji.

4.3 Ketidakpastian Kalibrasi Alat

Ketidakpastian kalibrasi berasal dari alat uji yang digunakan untuk pengujian. Parameter gaya luluh dan tarik menggunakan UTM dan regangan menggunakan *vernier caliper*. Perhitungan

masing-masing parameter sesuai persamaan (8) dengan hasil tertera pada Tabel 7.

Tabel 7 Rangkuman ketidakpastian kalibrasi alat.

\varnothing (mm)	$u_{B1}(\sigma_y)$ (MPa)	$u_{B1}(\sigma_t)$ (MPa)	$u_{B1}(E)$ (%)
10	0.16	0.21	-0.012
13	0.17	0.22	-0.012
16	0.16	0.21	-0.012
19	0.15	0.20	-0.012
22	0.16	0.21	-0.012
25	0.17	0.22	-0.012
29	0.16	0.22	-0.012
32	0.16	0.16	-0.012

Pada Tabel 7, variasi nilai ketidakpastian kalibrasi alat tidak terlalu jauh berbeda antar diameter sampel. Nilai ketidakpastian kalibrasi alat ukur kuat luluh berada di rentang 0.16 MPa hingga 0.17 MPa dan pada kuat tarik direntang 0.16 hingga 0.21 MPa. Nilai ketidakpastian kalibrasi alat ukur regangan untuk semua diameter memiliki nilai yang sama yaitu -0.012%. Hal ini menunjukkan bahwa, besarnya diameter sampel, tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap nilai ketidakpastian kalibrasi. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh Kumar et al (2022).

4.4 Ketidakpastian Resolusi Alat

Ketidakpastian resolusi alat untuk masing-masing parameter dihitung dengan menggunakan persamaan (9) dimana nilai R diambil dari sertifikat kalibrasi alat yang digunakan. Resolusi UTM dan *vernier caliper* masing-masing adalah 10 N dan 0.05 mm. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Rangkuman ketidakpastian resolusi alat.

\varnothing (mm)	$u_{B2}(\sigma_y)$ (MPa)	$u_{B2}(\sigma_t)$ (MPa)	$u_{B2}(E)$ (%)
10	0.037	0.037	-0.008
13	0.021	0.021	-0.008
16	0.014	0.014	-0.009
19	0.010	0.010	-0.009
22	0.008	0.008	-0.009
25	0.006	0.006	-0.009
29	0.004	0.004	-0.008
32	0.004	0.004	-0.009

Sesuai Tabel 8, nilai ketidakpastian resolusi UTM dalam mengukur kuat luluh dan kuat tarik bernilai antara 0.004 MPa hingga 0.037 MPa dengan nilai terbesar berada pada sampel ukuran 10 mm. Sedangkan pada resolusi alat untuk regangan, ketidakpastian yang dihasilkan memiliki rentang yang kecil yaitu antara -0.009% hingga -0.008%. Secara umum nilai ketidakpastian yang bersumber dari resolusi alat menghasilkan kontribusi paling kecil diantara ketidakpastian lainnya. Hal ini juga sesuai dengan perhitungan yang dilakukan oleh Kumar et al (2022).

4.5 Ketidakpastian Baku Pengukuran

Ketidakpastian baku pengukuran parameter mekanis dihitung dengan menggunakan persamaan (5), dimana melibatkan seluruh sumber ketidakpastian yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 9 sebagai berikut.

Tabel 9 Ketidakpastian baku pengukuran mekanis.

\varnothing (mm)	$u_c(\sigma_y)$ (MPa)	$u_c(\sigma_t)$ (MPa)	$u_c(E)$ (%)
10	1.54	1.20	0.25
13	1.67	1.44	0.31
16	0.96	0.66	0.14
19	1.04	0.76	0.08
22	1.22	0.45	0.31
25	0.53	0.31	0.25
29	0.81	0.48	0.11
32	0.63	0.63	0.18

Hasil perhitungan nilai ketidakpastian baku pengukuran pada Tabel 9 menunjukkan bahwa parameter kuat luluh memiliki nilai ketidakpastian dengan rentang nilai 0.96 MPa hingga 1.67 MPa, dimana nilai terendah dan tertinggi tersebut berada pada sampel dengan ukuran 25 mm dan 13 mm. Hal yang sama juga terjadi pada parameter kuat tarik dimana nilai ketidakpastian terendah yaitu 0.31 MPa dan tertinggi 1.44 MPa dengan ukuran sampel yang sama. Nilai ketidakpastian baku pengukuran pada kuat luluh cenderung lebih besar dari pada kuat tarik untuk ukuran yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya semakin bervariasi hasil uji suatu parameter, maka akan besar pula nilai ketidakpastian baku pengukurannya. Hal senada juga dihasilkan oleh Suhartono dan Rustianto (2022).

Pada parameter regangan, ketidakpastian baku pengukuran tertinggi yaitu sebesar 0.21% pada ukuran sampel 22 mm dan 13 mm, serta nilai terendah pada sampel ukuran 19 mm yakni sebesar 0.08%.

4.6 Ketidakpastian Pengukuran Diperluas

Ketidakpastian pengukuran diperluas masing-masing parameter dihitung menggunakan persamaan (11) dengan melibatkan derajat kebebasan efektif pada persamaan (6), dan koefisien ekspansi pada persamaan (12). Nilai ketidakpastian pengukuran diperluas, derajat kebebasan efektif, dan koefisien ekspansi yang dihasilkan disajikan pada Tabel 10.

Pada Tabel 10 tersebut, untuk parameter kuat luluh dari setiap diameter sampel memiliki nilai variasi yang tidak signifikan, dimana nilai ketidakpastian diperluas terbesar dihasilkan dari sampel uji ukuran 13 mm dengan nilai 3.77 MPa, sedangkan nilai ketidakpastian terkecil diperoleh sampel ukuran 25 mm yaitu 1.17 MPa. Nilai

ketidakpastian diperluas gaya luluh cenderung menurun seiring dengan semakin besarnya ukuran sampel uji. Sampel dengan ukuran besar menunjukkan variasi hasil yang lebih sempit sehingga menurunkan nilai ketidakpastian pengukurannya.

Pada parameter kuat tarik, dimana nilai ketidakpastian diperluas tertinggi dihasilkan sampel ukuran 13 mm (3.23 MPa) dan terendah oleh sampel ukuran 25 mm (0.62 MPa). Nilai ketidakpastian pengukuran cenderung menurun seiring besarnya ukuran sampel yang diuji. Jika dibandingkan dengan ketidakpastian diperluas pada kuat luluh, ketidakpastian pengukuran diperluas kuat tarik memiliki nilai yang lebih kecil untuk ukuran yang sama. Hal ini menandakan bahwa, untuk mekanis terkait kuat tarik, menghasilkan variasi hasil yang lebih rendah dibandingkan kuat luluh. Terdapat 2 ukuran dengan nilai ketidakpastian diperluas berada di rentang ± 1 MPa yaitu 22 mm dan 25 mm.

Tabel 10 Nilai derajat kebebasan efektif, koefisien ekspansi, dan ketidakpastian pengukuran diperluas.

\emptyset (mm)	Kuat Luluh (σ_y)			Kuat Tarik (σ_t)			Regangan (E)		
	v_{eff}	k_{exp}	U_{exp} (MPa)	v_{eff}	k_{exp}	U_{exp} (MPa)	v_{eff}	k_{exp}	U_{exp} (%)
10	9.20	2.26	3.47	9.59	2.24	2.69	9.06	2.26	0.56
13	9.19	2.26	3.77	9.44	2.25	3.23	9.04	2.26	0.69
16	9.53	2.24	2.16	11.24	2.20	1.44	9.22	2.25	0.31
19	9.39	2.25	2.34	10.42	2.22	1.68	9.61	2.24	0.19
22	9.31	2.25	2.74	14.39	2.14	0.97	9.04	2.26	0.70
25	11.03	2.20	1.17	37.89	2.02	0.62	9.06	2.26	0.57
29	9.79	2.24	1.82	14.60	2.14	1.03	9.33	2.25	0.25
32	10.26	2.22	1.40	10.26	2.22	1.40	9.13	2.26	0.41

Pada parameter regangan, nilai ketidakpastian tertinggi dihasilkan sampel ukuran 22 mm (0.70%) dan terendah oleh sampel ukuran 19 mm dengan nilai 0.19 %. Secara keseluruhan, ketidakpastian regangan baja tulangan memiliki nilai yang kecil ($\leq \pm 1\%$) sehingga menunjukkan kontrol kualitas yang baik selama pengujian (Kumar et al., 2022).

Menurut SNI ISO/IEC 17025:2017, hasil perhitungan ketidakpastian pengukuran dapat

digunakan sebagai dasar dalam membuat aturan keputusan yang bermanfaat dalam merumuskan kriteria keberterimaan produk. Aturan keputusan yang dipilih menghasilkan suatu interval keberterimaan yang dapat dijadikan acuan apakah hasil uji produk tersebut dapat diterima atau ditolak. Menurut (Kumar et al., 2022), untuk keperluan kontrol kualitas, diperlukan ketidakpastian yang kecil ($\leq \pm 1\%$).

4.7 Persentase Kontribusi Sumber Ketidakpastian

Perhitungan besar kontribusi dari sumber-sumber ketidakpastian pengukuran terhadap nilai ketidakpastian dihitung menggunakan persamaan (15). Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 11.

Pada Tabel 11, untuk parameter kuat luluh dan regangan, nilai kontribusi ketidakpastian terbesar untuk setiap ukuran bersumber dari

ketidakpastian pengujian sampel, dengan besar nilai persentase kontribusi diatas 90%. Pada kuat tarik, persentasi kontribusi ketidakpastian terbesar yang bersumber pengujian sampel bervariasi antara 48.74% hingga 97.65% dan hampir pada semua ukuran merupakan kontributor terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa, hasil pengujian sampel memberikan pengaruh besar terhadap ketidakpastian pengujian. Hasil yang sama diperlihatkan dalam penelitian oleh Suhartono & Rustianto (2022).

Table 11 Persentase kontribusi tiap sumber ketidakpastian.

Parameter	Sumber Ketidakpastian	Significant Value (%)							
		10	13	16	19	22	25	29	32
Kuat Luluh	u_A	98.92	98.94	97.18	97.89	98.33	90.32	95.86	93.66
	u_{B1}	1.03	1.04	2.80	2.10	1.66	9.67	4.13	6.34
	u_{B2}	0.06	0.02	0.02	0.01	0.004	0.01	0.003	0.003
Kuat Tarik	u_A	96.89	97.65	89.48	92.94	79.07	48.74	78.52	74.02
	u_{B1}	3.01	2.32	10.47	7.04	20.90	51.23	21.47	25.97
	u_{B2}	0.09	0.02	0.05	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01
Regangan	u_A	99.65	99.77	98.79	96.80	99.76	99.64	98.24	99.30
	u_{B1}	0.24	0.15	0.81	2.16	0.16	0.24	1.19	0.47
	u_{B2}	0.12	0.07	0.39	1.05	0.08	0.12	0.58	0.23

Kontribusi ketidakpastian pengukuran terbesar selanjutnya diberikan oleh ketidakpastian kalibrasi alat. Pada kuat luluh dan regangan, kontribusi ketidakpastian kalibrasi kurang dari 7%, sedangkan pada kuat tarik, kontribusi ketidakpastian kalibrasi tertinggi sebesar 51.23%. Hal ini menunjukkan bahwa, ketidakpastian kalibrasi dapat memberikan dominasi terhadap kontribusi ketidakpastian pengukuran seperti yang disimpulkan oleh Dhoska et al (2022), dimana kontribusi ketidakpastian kalibrasi alat menjadi kontribusi terbesar pada penelitian terkait ketidakpastian pengukuran mekanis pada produk *HRB400 reinforcement steel bar*.

Kontribusi terhadap ketidakpastian pengukuran terkecil bersumber dari ketidakpastian resolusi alat, dimana pada parameter kuat luluh memiliki nilai antara 0.003% hingga 0.06%, sedangkan pada parameter kuat tarik dan regangan terbentang antara 0.01% hingga 0.09% dan 0.08% hingga 1.05%. Besarnya ketidakpastian resolusi alat bergantung pada skala terkecil yang diukur oleh alat. Semakin besar skala yang dibaca, maka semakin besar pula kontribusi ketidakpastian resolusi alat yang digunakan. Hal ini ditunjukkan pada penelitian

Suhartono & Rustianto (2022), dimana ketidakpastian resolusi UTM terkecil dengan skala 500N adalah 1.83 MPa, sedangkan pada penelitian ini dengan skala terkecil 5N menghasilkan ketidakpastian resolusi UTM terkecil sebesar 0.004 MPa.

5. KESIMPULAN

Hasil perhitungan ketidakpastian pengukuran pada parameter kuat luluh diperoleh nilai yang berkisar antara 1.17 MPa hingga 3.77 MPa, kuat tarik berkisar antara 0.62 MPa hingga 3.23 MPa, dan regangan sebesar 0.19% hingga 0.70%. Hasil evaluasi ketidakpastian pengukuran menunjukkan bahwa ketidakpastian yang bersumber dari pengujian sampel secara umum merupakan kontributor terbesar dari ketidakpastian pengukuran mekanis, kemudian diikuti dengan ketidakpastian kalibrasi alat dan resolusi alat.

Berdasarkan hasil evaluasi, maka nilai ketidakpastian pengukuran ini dapat dijadikan dasar dalam membuat aturan keputusan yang bermanfaat dalam merumuskan kriteria keberterimaan pada baja tulangan beton sirip SNI

2052:2017 serta memberikan informasi untuk laboratorium pengujian agar lebih memperhatikan proses-proses yang terkait dengan pengujian sampel seperti standar operasional pengujian, instruksi kerja, kompetensi personel, dan fasilitas terkait. Hasil evaluasi terhadap kontribusi ketidakpastian juga dapat dijadikan dasar pertimbangan bagi laboratorium pengujian mekanis untuk lebih memperhatikan sumber-sumber ketidakpastian pengukuran yang memberikan pengaruh besar dalam akurasi hasil uji.

Penelitian ini belum melibatkan indikator ketidakpastian pengukuran lain seperti penggunaan alat bantu untuk mengukur 0.2% *offset* dalam penentuan titik kuat luluh sehingga disarankan untuk penelitian berikutnya agar indikator ini dapat dievaluasi lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Pengujian PT Putra Baja Deli yang telah menyediakan fasilitas pengujian untuk penelitian ini serta seluruh personil yang telah membantu selama proses pengujian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Fatah, H. T. M. (2010). ISO/IEC 17025 accreditation: between the desired gains and the reality. *The Quality Assurance Journal*, 13(1-2), 21-27.
- Achamyeh, T., Çamur, H., Savaş, M. A., & Evcil, A. (2022). Mechanical strength variability of deformed reinforcing steel bars for concrete structures in Ethiopia. *Scientific Reports*, 12(1), 2600. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06654-1>
- Agresti, A., & Franklin, C. (2013). *Statistics: The Art and Science of Learning from Data*. Pearson.
- Allen, E., & Iano, J. (2009). *Fundamentals of Building Construction* (5th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- American Concrete Institute. (2022). ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Aravinna, A. P. (2021). *Reinforcement Steel Estimation of Measurement Uncertainty in Determination of Tensile Strength of Reinforcement Steel Central Engineering Consultancy Bureau (CECB), Sri Lanka*. (Issue February). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14541.77287>
- Australia Standards. (2020). *Metallic materials - Tensile testing at ambient temperature (AS 1391:2020)*. Australia Standards
- Badan Standardisasi Nasional. (2017a). *Cara Uji Tarik Logam (SNI 8389:2017)*. Badan Standardisasi Nasional
- Badan Standardisasi Nasional. (2017b). *Baja Tulangan Beton (SNI 2052:2017)*. Badan Standardisasi Nasional
- Badan Standardisasi Nasional (2018). *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi (SNI ISO/IEC 17025:2017)*. BSN
- Badan Standardisasi Nasional (2019). *Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (SNI 2847:2019)*. Badan Standardisasi Nasional
- Daniyal, M., & Akhtar, S. (2020). Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1), 1-20. <https://doi.org/10.1007/s41024-019-0067-3>
- Daniyal, M., & Akhtar, S. (2020). Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5, 1-20.
- Dhoska, K., Lumi, D., Sulejmani, A., & Koça, O. (2022). Measurement uncertainty for mechanical resistance of manufactured steel bar. *Pollack Periodica* (17)2, 104-108. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00532>
- Djavanroodi, F., & Salman, A. (2017). Variability of Mechanical Properties and Weight for Reinforcing Bar Produced in Saudi Arabia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (230)1, 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/230/1/012002>
- Ede, A. N., Egunjobi, E. O., Bamigboye, G. O., & Ogundeji, J. (2015). Assessment of quality of steel reinforcing bars used in Lagos, Nigeria.

- International Research Journal of Innovative Engineering*, 1(3), 1–8.
- Ede, A. N., Akpabot, A. I., Olofinnade, O. M., & Oyeyemi, K. D. (2018). Forecasting the hazards of seismic induced building collapse in Lagos Nigeria through quality of reinforcing steel bars. *International journal of mechanical engineering and technology*, 9, 766-775.
- Faridah, D. N., Erawan, D., Sutriah, K., Hadi, A., & Budiantari, F. (2018). Implementasi SNI ISO/IEC 17025: 2017 Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi (I). *Badan Standardisasi Nasional*.
- Firat, F. K. (2016). Mechanical properties of reinforcing steel in r/c: uncertainty analysis and proposal of a new material factor. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4019-4028. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2077-7>
- Hadi, A. (2018). *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian & Laboratorium Kalibrasi ISO/IEC 17025: 2017*. Gramedia Pustaka Utama.
- Hogan, R. (2017). How to find significant contributors to measurement uncertainty. <https://www.isobudgets.com/significant-contributors-to-measurement-uncertainty/>
- International Laboratory Accreditation Cooperation. (2015). *The ILAC Mutual Recognition Arrangement*. <https://ilac.org/?ddownload=891>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections). Joint Committee for Guides in Metrology.
- Komite Akreditasi Nasional (n.d.). *Direktori Klien Laboratorium Penguji (17)*. Diakses pada 30 Desember 2022, melalui <http://kan.or.id/index.php/documents/terakreditasi/doc17020/sni-iso-iec-17025/laboratorium-pengujian?layout=edit&id=186>
- Kumar, U., Prasad, A., Singh, S., & Kanjilal, P. (2022). Measurement of uncertainties in tensile test properties of Thermo-mechanically Treated (TMT) steel bars. *Materials Today: Proceedings*, 67, 507-516. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.473>
- Miguel, A., Moreiraa, R., & Oliveira, A. (2021). ISO/IEC 17025: History and introduction of concepts. *Quimica Nova*, (44)6, 792-796. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170726>.
- Suhartono, H., Rustianto, B. (2022). Estimating of measurement uncertainty of tensile strength test for deformed steel bars for concrete reinforcement. *Proceeding of the 1St International Conference on Standardization and Metrology (Iconstam)*, (2664) Nov, 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0108791>
- Teddy Chandra, S. E., MM, P., & Priyono, M. M. (2023). *Statistika Deskriptif*. Malang: CV Literasi Nusantara Abadi.
- Trivedi, A. S., Bhadoriya, A. S., & Sharma, M. (2018). A Review on Corrosion of Steel Reinforced in Cement Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(4), 2513–2516.
- Undang-Undang No. 14 Tahun 2018 *Tentang Pemberlakuan SNI Baja Tulangan Beton Secara Wajib* (Indonesia). Diakses tanggal 26 Desember 2022 dari http://jdih.kemenperin.go.id/site/baca_peraturan/2398
- Undang-Undang No. 20 Tahun 2014 *Tentang Standardisasi dan Penilaian Kesesuaian* (Indonesia). Diakses tanggal 26 Desember 2022 dari <https://jdih.kemenparekraf.go.id/katalog-998-produk-hukum>.