

EVALUASI KINERJA KALIBRASI *DIAL HEIGHT GAUGE* BERDASARKAN JIS B 7517-2018: ANALISIS DEVIASI DAN PENILAIAN KESESUAIAN

Stephen Alexander Sembiring¹, Aulia Fajrin^{2*}, Annisa Fyona¹, Mutiarani¹, Hendra Butar Butar¹, Ita Wijayanti¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

²Program Studi Teknologi Rekayasa Metalurgi, Politeknik Negeri Batam

*Corresponding author: auliafajrin@polibatam.ac.id

Article history

Received:

12-05-2026

Accepted:

26-06-2026

Published:

30-06-2026

Copyright © 2026
Jurnal Teknologi dan
Riset Terapan

Open Access

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kinerja *dial height gauge* Mitutoyo (resolusi 0,01 mm, rentang 0–600 mm) berdasarkan standar JIS B 7517-2018 melalui analisis deviasi dan daya ulang pada sembilan *set point* (20–600 mm) menggunakan *gauge block* Grade 0 bersertifikat sebagai standar acuan pada kondisi laboratorium 20 ± 1 °C dan kelembapan 50–60%. Hasil evaluasi menunjukkan deviasi maksimum sebesar –0,0033 mm (pada *set point* 20 mm), di bawah batas *Maximum Permissible Error* (MPE) $\pm 0,020$ mm sesuai JIS B 7517-2018. Daya ulang terbesar adalah 0,01 mm, tepat memenuhi batas daya ulang standar. Seluruh sembilan titik ukur dinyatakan *pass*. Pola deviasi negatif konsisten pada rentang ≤ 200 mm mengindikasikan kesalahan sistematis minor yang berkorelasi dengan pelanggaran Prinsip Abbe pada rentang ukur pendek. Temuan ini memiliki implikasi langsung bagi pengendalian kualitas manufaktur presisi.

Kata Kunci: Daya Ulang, Deviasi, Height Gauge, JIS B 7517-2018, Kalibrasi, Ketidakpastian Pengukuran

Abstract

This study evaluates the performance of a Mitutoyo dial height gauge (resolution 0.01 mm, range 0–600 mm) in accordance with JIS B 7517-2018 through deviation analysis and repeatability assessment at nine set points (20–600 mm), using a certified Grade 0 gauge block as reference standard under laboratory conditions of 20 ± 1 °C and 50–60% relative humidity. The maximum deviation recorded was –0.0033 mm (at the 20 mm set point), below the Maximum Permissible Error (MPE) of ± 0.020 mm per JIS B 7517-2018. The largest repeatability value was 0.01 mm, satisfying the standard limit. All nine measurement points passed the conformance criteria. A consistent negative deviation pattern at set points ≤ 200 mm indicates a minor systematic error correlated with Abbe principal violation at short measurement ranges, with direct implications for quality assurance in precision manufacturing.

Keywords: Repeatability, Deviation, Height Gauge, JIS B 7517-2018, Calibration, Measurement Uncertainty

1.0 PENDAHULUAN

Dalam industri manufaktur modern, akurasi pengukuran dimensi merupakan prasyarat fundamental bagi keberhasilan sistem pengendalian kualitas. Alat ukur yang tidak terkalibrasi secara berkala berisiko menghasilkan data pengukuran yang menyimpang dari nilai sebenarnya, yang pada akhirnya dapat menyebabkan

produk gagal memenuhi spesifikasi geometris yang ditetapkan [1] [2]. *Height gauge* merupakan salah satu instrumen kunci dalam pengukuran dimensi vertikal, digunakan untuk mengukur tinggi, kedalaman, dan jarak antar fitur pada komponen mesin, cetakan (*mold*), *jig* and *fixture*, serta papan sirkuit elektronik. Performa *height gauge* harus dievaluasi secara periodik melalui kalibrasi yang tertelusur ke standar internasional [3].

Kalibrasi dalam metrologi industri didefinisikan sebagai serangkaian operasi yang menentukan hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen pengukur dengan nilai yang diketahui dari suatu standar [4]. Kalibrasi mencakup penentuan ketidakpastian pengukuran dan ketertelusuran ke standar nasional maupun internasional [5]. Dalam konteks sistem mutu berbasis ISO 9001:2015, kalibrasi alat ukur merupakan elemen wajib yang berdampak langsung pada kepercayaan data inspeksi dan keputusan pelepasan produk [6].

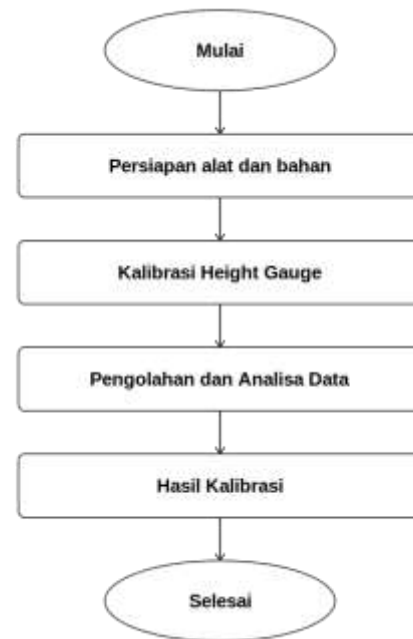
Standar JIS B 7517-2018 merupakan acuan teknis yang banyak digunakan di Asia, termasuk Indonesia, untuk kalibrasi *height gauge*. Standar ini menetapkan persyaratan kondisi lingkungan, alat acuan, prosedur pengukuran, kriteria *Maximum Permissible Error* (MPE), serta evaluasi daya ulang [7]. Dibandingkan dengan ISO 13225:2012 [8] yang berfokus pada karakteristik desain instrumen, JIS B 7517 menawarkan prosedur kalibrasi yang lebih operasional dan dapat langsung diterapkan di laboratorium industri.

Penelitian [9] menunjukkan bahwa kesalahan kalibrasi pada instrumen pengukur dimensi secara konsisten menjadi penyumbang utama ketidaksesuaian produk dalam industri manufaktur presisi, dengan estimasi kontribusi hingga 35% dari total kesalahan inspeksi. Artikel [10] mengonfirmasi bahwa variasi temperatur di atas ± 1 °C dapat menyebabkan ekspansi termal diferensial pada batang baja hingga 0,007 mm untuk panjang 600 mm. Salah satu jurnal [11] menekankan bahwa dokumentasi ketidakpastian pengukuran yang lengkap merupakan syarat mutlak ketertelusuran metrologi sesuai panduan salah satu artikel [12] membuktikan bahwa pelanggaran Prinsip Abbe pada desain *height gauge* berkolom lateral menghasilkan kesalahan angular yang bervariasi terhadap panjang ukur, sedangkan jurnal [13] mengkuantifikasi kesalahan Abbe dapat mencapai 0,005–0,010 mm per 100 mm pada instrumen tanpa kompensasi.

Meskipun sejumlah penelitian telah membahas prosedur kalibrasi *height gauge* dan faktor yang mempengaruhinya, evaluasi kinerja *dial height gauge* dengan pendekatan multi-*set point* yang mencakup rentang ukur penuh (20–600 mm), disertai analisis deviasi per titik, penilaian daya ulang terstruktur, dan diskusi implikasi terhadap jaminan kualitas manufaktur, masih terbatas dalam literatur. Penelitian ini mengisi celah tersebut dan bertujuan: (1) mengevaluasi deviasi *dial height gauge* Mitutoyo pada sembilan *set point* terhadap MPE JIS B 7517-2018; (2) menganalisis daya ulang pengukuran pada setiap titik ukur; serta (3) mengkaji implikasi hasil kalibrasi terhadap pengendalian kualitas dimensi dalam manufaktur presisi.

2.0 METODE

Penelitian ini dilakukan dengan kalibrasi pengukuran aktual pada *height gauge* dengan menggunakan standar acuan yang telah ditentukan dan membandingkan hasil pengukuran aktual dengan standar dari JIS B 7517-2018. Metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah evaluasi pada *height gauge* sesuai dengan standar acuannya. Berikut ini adalah diagram alir yang terdapat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

2.1. Desain Penelitian dan Justifikasi Pemilihan Set Point

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-evaluatif berbasis pengukuran metrologi. Sembilan *set point* (20, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, dan 600 mm) dipilih berdasarkan tiga pertimbangan utama. Pertama, *set point* 20–200 mm mewakili rentang kerja umum dalam inspeksi komponen presisi. Kedua, *set point* 300–600 mm menguji performa alat di rentang menengah hingga kapasitas penuh. Ketiga, distribusi titik ukur mengikuti rekomendasi JIS B 7517-2018, dengan setiap *set point* diukur sebanyak tiga kali pengulangan [7].

Instrumen yang dikalibrasi adalah *Dial Height Gauge* Mitutoyo (S/N: 8627298, resolusi 0,01 mm, rentang 0–600 mm). Standar acuan yang digunakan adalah dua set *gauge block* Grade 0 bersertifikat: (a) Mitutoyo (S/N: 0506567, rentang 0,5–100 mm) dan (b) OPUS (S/N: 01840P, rentang 125–500 mm). *Gauge block* Grade 0 dipilih karena memenuhi persyaratan rasio ketidakpastian acuan terhadap UUT ($\leq 1:4$) sesuai panduan KAN [14]. Peralatan pendukung meliputi meja granit Mitutoyo (900 × 600 mm). Gambar 2, gambar 3, dan gambar 4 menampilkan masing-masing peralatan yang digunakan.



Gambar 2: Gauge block Set Grade 0 Mitutoyo

Standar acuan pertama yang digunakan adalah *Gauge Block Set Grade 0 Mitutoyo*, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Instrumen ini buatan Jepang dengan merek Mitutoyo, bernomor seri 0506567, dan memiliki rentang ukur 0,5–100 mm. Standar acuan kedua adalah *Gauge Block Set Grade 0 OPUS*, ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3: *Gauge block Set Grade 0 OPUS*

Instrumen ini buatan Inggris dengan merek OPUS, bernomor seri 01840P, dan memiliki rentang ukur 125–500 mm. Instrumen yang dikalibrasi adalah *Dial Height Gauge Mitutoyo*, ditampilkan pada Gambar 4. Instrumen ini buatan Jepang dengan merek Mitutoyo, bernomor seri 8627298, memiliki resolusi 0,01 mm, dan rentang ukur 0–600 mm.



Gambar 4: *Dial Height Gauge*

2.3. Kondisi Lingkungan Kalibrasi

Seluruh proses kalibrasi dilakukan dalam ruang kalibrasi terkontrol pada temperatur 20 ± 1 °C, kelembapan relatif $50 \pm 10\%$, bebas getaran dan kontaminasi debu. *Height gauge* dan *gauge block* dikondisikan selama minimum 24 jam sebelum pengukuran untuk stabilisasi termal [10]. Kondisi lingkungan aktual dicatat pada lembar kerja kalibrasi sebagai dokumentasi ketidakpastian tipe B.

2.4. Prosedur Kalibrasi

Kalibrasi dilaksanakan mengacu pada JIS B 7517-2018 [7] dan panduan KAN [14]. Sebelum pengukuran dimulai, seluruh permukaan meja granit, *gauge block*, dan *probe* dibersihkan menggunakan alkohol isopropil guna mengeliminasi kontaminan yang dapat memengaruhi

ketelitian pengukuran. Titik nol kemudian ditetapkan pada permukaan *surface plate* setelah terlebih dahulu dipastikan bahwa pergerakan rahang berjalan lancar tanpa hambatan mekanis. Selanjutnya, *gauge block* ditempatkan pada setiap *set point* yang sesuai, dan *probe* diturunkan hingga menyentuh permukaan atas *gauge block* untuk dibaca nilainya. Pengukuran diulang sebanyak tiga kali pada setiap *set point* dan hasilnya dicatat secara sistematis pada lembar kerja kalibrasi. Prosedur yang sama diterapkan secara berurutan pada seluruh titik ukur hingga 600 mm.

2.5. Rumus Deviasi

Rumus deviasi *height gauge*:

$$\text{Deviasi} = \text{UUT}(\text{Unit Under Test}) - \text{Pembacaan Standar Kalibrasi} \quad (1)$$

UUT adalah barang atau unit yang sedang diuji, untuk barang yang diuji adalah *height gauge*. Pembacaan standar kalibrasi adalah pembacaan pada standar yang digunakan selama proses kalibrasi yaitu *gauge block* (blok ukur).

2.6. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, nilai rata-rata (\bar{x}) dari tiga pengulangan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\bar{x} = \frac{(x_1 + x_2 + x_3)}{3} \quad (2)$$

Kedua, nilai deviasi (d) dihitung sebagai selisih antara nilai rata-rata *Unit Under Test* (UUT), dalam penelitian ini adalah *height gauge* yang dikalibrasi terhadap nilai nominal *gauge block* sebagai standar acuan, menggunakan Persamaan (2):

$$d = \bar{x} - x_{\text{standar}} \quad (3)$$

Ketiga, daya ulang (R) dihitung sebagai selisih pembacaan maksimum dan minimum dari tiga pengulangan pada setiap *set point*, menggunakan Persamaan (3):

$$R = x_{\text{maks}} - x_{\text{min}} \quad (4)$$

Instrumen dinyatakan lulus (*pass*) apabila $|d| \leq \text{MPE}$ dan $R \leq$ batas daya ulang standar sesuai JIS B 7517-2018.

2.7. Toleransi Berdasarkan JIS B 7517-2018

Tabel 1: Batas Toleransi Height Gauge Menurut JIS B 7517-2018 (Resolusi 0,01 mm)

Rentang Ukur (mm)	MPE (mm)	Batas Daya Ulang (mm)
≤ 300	$\pm 0,015$	0,010
300 – 600	$\pm 0,020$	0,010
600 – 1000	$\pm 0,030$	0,015
1000 – 1500	$\pm 0,040$	0,020

Tabel 1 menyajikan batas toleransi pengukuran *height gauge* berdasarkan resolusinya. Untuk instrumen dengan resolusi 0,01 mm yang digunakan dalam penelitian ini, batas toleransi pada rentang ≤ 50 mm adalah $\pm 0,02$ mm pada temperatur referensi 20 °C.

Tabel 2 menunjukkan bahwa untuk *height gauge* beresolusi 0,01 mm (kolom kanan), batas toleransi pada rentang ≤ 50 mm adalah $\pm 0,02$ mm, meningkat secara bertahap seiring panjang ukur. Nilai-nilai ini menjadi acuan penilaian pass/fail pada seluruh titik ukur yang dibahas pada Bagian 3.

Tabel 2: Batas Toleransi Pengukuran *Height Gauge*

<i>Measuring Length</i>	<i>Minimum Maximun 0.05 mm</i>	<i>Minimum Maximun 0.02 or 0.01 mm</i>
<i>50 or under</i>	± 0.05	± 0.02
<i>Over 50 to 100 or under</i>	± 0.06	± 0.03
<i>Over 100 to 200 or under</i>	± 0.07	
<i>Over 200 to 300 or under</i>	± 0.08	± 0.04
<i>Over 300 to 400 or under</i>	± 0.09	
<i>Over 400 to 500 or under</i>	± 0.10	± 0.05
<i>Over 500 to 600 or under</i>	± 0.11	
<i>Over 600 to 700 or under</i>	± 0.12	± 0.06
<i>Over 700 to 800 or under</i>	± 0.13	
<i>Over 800 to 900 or under</i>	± 0.14	± 0.07
<i>Over 900 to 1000 or under</i>	± 0.15	

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengukuran dan Analisis Deviasi

Tabel 3 menyajikan rekapitulasi hasil kalibrasi *dial height gauge* pada seluruh *set point*, mencakup nilai rata-rata tiga pengulangan, deviasi, daya ulang, MPE yang berlaku, dan status kelulusan. Sebagai contoh perhitungan pada *set point* 20 mm ($x_1 = 20,00$ mm, $x_2 = 19,99$ mm, $x_3 = 20,00$ mm): $\bar{x} = 19,9967$ mm; $d = -0,0033$ mm; $R = 0,01$ mm. Karena $|-0,0033 \text{ mm}| < \text{MPE } \pm 0,020$ mm dan $R = 0,01$ mm \leq batas daya ulang 0,01 mm, *set point* 20 mm dinyatakan pass. Prosedur yang sama diterapkan pada kedelapan *set point* lainnya.

Secara keseluruhan, data pada Tabel 3 memperlihatkan dua kelompok perilaku pengukuran yang berbeda. Kelompok pertama mencakup *set point* 20, 50, 150, dan 200 mm yang secara konsisten menunjukkan deviasi negatif $-0,0033$ mm disertai daya ulang 0,01 mm. Kelompok kedua mencakup *set point* 100, 300, 400, 500, dan 600 mm yang menunjukkan deviasi 0,0000 mm dan daya ulang 0,00 mm. Perbedaan pola antar kelompok ini tidak bersifat acak, melainkan mencerminkan karakteristik sistematis instrumen yang berkaitan dengan rentang ukur. Nilai 0,0000 mm pada kelompok kedua

tidak berarti instrumen bebas dari penyimpangan absolut, melainkan bahwa deviasi aktual berada di bawah ambang resolusi 0,01 mm sehingga tidak dapat terdeteksi oleh instrumen. Fenomena ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan keterbatasan resolusi dalam interpretasi data kalibrasi, sebagaimana ditekankan oleh Doiron dan Stoup [11].

Tabel 3: Rekapitulasi Hasil Kalibrasi *Dial Height Gauge*

<i>Set Point (mm)</i>	<i>Rata-rata (mm)</i>	<i>Deviasi (mm)</i>	<i>Daya Ulang (mm)</i>	<i>MPE (mm)</i>	<i>Status</i>
20	19,9967	$-0,0033$	0,01	$\pm 0,020$	Pass
50	49,9967	$-0,0033$	0,01	$\pm 0,020$	Pass
100	100,0000	0,0000	0,00	$\pm 0,020$	Pass
150	149,9967	$-0,0033$	0,01	$\pm 0,020$	Pass
200	199,9967	$-0,0033$	0,01	$\pm 0,020$	Pass
300	300,0000	0,0000	0,00	$\pm 0,020$	Pass
400	400,0000	0,0000	0,00	$\pm 0,020$	Pass
500	500,0000	0,0000	0,00	$\pm 0,020$	Pass
600	600,0000	0,0000	0,00	$\pm 0,020$	Pass

3.2. Pola Deviasi dan Interpretasi Hasil

Dari Tabel 3, dua pola deviasi teridentifikasi. Pertama, deviasi negatif konsisten $-0,0033$ mm ditemukan pada *set point* 20, 50, 150, dan 200 mm. Dari perspektif geometris, jurnal [12] menunjukkan bahwa pelanggaran Prinsip Abbe pada *height gauge* berkolom lateral menghasilkan kesalahan angular yang bervariasi sesuai panjang ukur. Artikel [13] mengkuantifikasi kesalahan Abbe mencapai 0,005–0,010 mm per 100 mm pada instrumen tanpa kompensasi. Deviasi $-0,0033$ mm yang ditemukan dalam penelitian ini berada dalam rentang prediksi teoritis tersebut untuk panjang ukur 20 - 200 mm. Dari perspektif resolusi, artikel [11] menegaskan bahwa instrumen resolusi 0,01 mm memiliki batas deteksi inheren yang membatasi ketelitian pembacaan ke satuan 0,005 mm.

Kedua, deviasi 0,0000 mm pada *set point* 100, 300, 400, 500, dan 600 mm mencerminkan bahwa deviasi aktual lebih kecil dari resolusi instrumen sehingga tidak terdeteksi, bukan berarti ketiadaan penyimpangan absolut. Salah satu referensi [9] mengingatkan bahwa klaim akurasi absolut pada instrumen resolusi terbatas justru berisiko menyesatkan, karena kesalahan submikron yang tidak terdeteksi tetap dapat terakumulasi dalam produksi massal. Salah satu jurnal [10] melaporkan deviasi tipikal 0,002–0,005 mm pada kondisi lingkungan terkontrol, konsisten dengan nilai $-0,0033$ mm penelitian ini. Jurnal [15] menemukan bahwa instrumen sejenis di laboratorium tidak terakreditasi menunjukkan variabilitas deviasi lebih besar (0,008–0,015 mm), menggarisbawahi pentingnya pengendalian kondisi lingkungan dan standar acuan bersertifikat.

3.3. Analisis Daya Ulang

Daya ulang maksimum 0,01 mm terjadi pada *set point* 20, 50, 150, dan 200 mm, tepat pada batas atas JIS B 7517-2018 untuk rentang ≤ 600 mm. Menurut penelitian [16], instrumen yang menunjukkan daya ulang mendekati batas MPE selama dua siklus kalibrasi berturut-turut mengindikasikan degradasi mekanis progresif dan sebaiknya dijadwalkan untuk perawatan preventif.

Sebaliknya, daya ulang 0,00 mm pada *set point* 100, 300, 400, 500, dan 600 mm mencerminkan konsistensi pembacaan yang sangat tinggi. Salah satu jurnal [17] menjelaskan bahwa konsistensi ini pada rentang ukur besar disebabkan oleh stabilitas mekanis sistem penahan kolom pada *dial height gauge*. Penelitian [18] menunjukkan bahwa *dial height gauge* berbasis mekanisme pegas mempertahankan daya ulang lebih baik daripada sistem pembacaan digital pada rentang ukur di atas 300 mm.

3.4. Implikasi terhadap Jaminan Kualitas Manufaktur Presisi

Dalam inspeksi komponen dengan toleransi geometris ketat (IT6–IT7 sesuai ISO 286), toleransi yang diizinkan untuk diameter nominal 50 mm hanya berkisar 13–19 μm . Deviasi instrumen sebesar 3,3 μm (33% dari satu satuan toleransi IT6) sudah cukup signifikan untuk mempengaruhi keputusan inspeksi pada produk yang berada di tepi batas spesifikasi. Dalam perakitan multi-komponen, jika lima komponen masing-masing diukur dengan instrumen yang memiliki deviasi $-0,0033$ mm, kesalahan kumulatif teoritis dapat mencapai $-0,0165$ mm, melampaui kelonggaran (*clearance*) yang diizinkan pada pasangan presisi. Referensi [16] mengonfirmasi bahwa kesalahan instrumen yang tidak terkoreksi merupakan penyebab utama penolakan pada tahap inspeksi akhir rakitan presisi. Pengguna di lingkungan manufaktur presisi disarankan untuk menerapkan faktor koreksi ($-0,003$ mm) pada pengukuran di rentang 20–200 mm [5] [19]. Hasil kalibrasi ini juga mengonfirmasi kesesuaian prosedur dengan persyaratan ISO 9001:2015 klausul 7.1.5 mengenai ketertelusuran sumber daya pengukuran [6].

4.0 KESIMPULAN

Evaluasi kalibrasi *dial height gauge* Mitutoyo berdasarkan JIS B 7517-2018 membuktikan bahwa instrumen dinyatakan *pass* pada seluruh sembilan titik ukur. Deviasi maksimum sebesar $-0,0033$ mm terjadi pada *set point* 20, 50, 150, dan 200 mm, jauh di bawah MPE $\pm 0,020$ mm, sementara daya ulang terbesar 0,01 mm tepat memenuhi batas standar. Pola deviasi negatif yang konsisten pada rentang ≤ 200 mm berkorelasi dengan kesalahan Abbe pada desain kolom lateral instrumen, konsisten dengan prediksi artikel [12] dan jurnal [13], dan mengindikasikan kesalahan sistematis minor yang dapat diidentifikasi serta dikoreksi.

Meskipun instrumen dinyatakan layak pakai, deviasi sistematis $-0,0033$ mm pada rentang 20 – 200 mm memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam manufaktur presisi toleransi ketat (IT6–IT7): pada diameter nominal 50 mm, deviasi ini setara dengan

17– 25% dari satu satuan toleransi, sehingga penerapan faktor koreksi pada rentang tersebut sangat direkomendasikan [5][19]. Penelitian lanjutan disarankan mencakup estimasi ketidakpastian pengukuran secara lengkap sesuai panduan GUM [5], pengkajian pengaruh variasi operator melalui studi *Gauge R&R*, serta perbandingan kinerja *dial* dan *digital height gauge* dari pabrikan yang sama untuk memperluas basis data metrologi instrumen dimensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Lv, C. Hu, W. Du, and X. Wang, "Dimension Measurement and Quality Control during the Finishing Process of Large-Size and High-Precision Components," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2022, pp. 1–8, Mar. 2022, doi: 10.1155/2022/3955974.
- [2] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th ed, 7th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2014.
- [3] Imam Prasetyo and Alfa Yuliana Dewi, *Metrologi Industri & Kontrol Kualitas dalam Bidang Teknik*. Pekalongan: NEM, 2025.
- [4] J. 200 Joint Committee for Guides in Metrology, "International Vocabulary of Metrology (VIM)," Paris, 2012.
- [5] E. of M. D. Joint Committee for Guides in Metrology, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)," Paris, 2020.
- [6] ISO, *ISO 9001:2015. Quality Management Systems: Requirements*. Switzerland, 2015.
- [7] Japanese Industrial Standards Committee, *JIS B 7517:2018. Method of Calibration for Height Gauges*. Japan, 2018.
- [8] ISO, *ISO 13225:2012. Dimensional Measuring Instruments: Height Gauges*. Switzerland, 2012.
- [9] W. de O. S. Soares, R. S. Peruchi, R. A. V. Silva, and P. Rotella Junior, "Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review," *Qual. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 382–403, Jul. 2022, doi: 10.1080/08982112.2022.2069505.
- [10] V. Samelova, J. Pekarova, F. Bradac, J. Vetiska, M. Samel, and R. Jankovych, "Experimental Study of Ambient Temperature Influence on Dimensional Measurement Using an Articulated Arm Coordinate Measuring Machine," *Metrology*, vol. 5, no. 3, p. 45, Aug. 2025, doi: 10.3390/metrology5030045.
- [11] T. Doiron and J. Stoup, "Uncertainty and dimensional calibrations," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 102, no. 6, p. 647, Nov. 1997, doi: 10.6028/jres.102.044.
- [12] X. Li, W. Gao, H. Muto, Y. Shimizu, S. Ito, and S. Dian, "A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage," *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 771–781, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.03.005.
- [13] Z. Zhang *et al.*, "Design method and error analysis of 3D measurement system in

- accordance with the Abbe principle,” *Measurement*, vol. 252, p. 117369, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.117369.
- [14] Komite Akreditasi Nasional, *Panduan Kalibrasi Alat Ukur Dimensi: Height Gauge*. Indonesia, 2021.
- [15] H. Haitjema, “Calibration of Displacement Laser Interferometer Systems for Industrial Metrology,” *Sensors*, vol. 19, no. 19, p. 4100, Sep. 2019, doi: 10.3390/s19194100.
- [16] J. Schaude and T. Hausotte, “Uncertainty-based determination of recalibration dates,” *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, vol. 15, p. 2, Feb. 2024, doi: 10.1051/ijmqe/2023017.
- [17] W. Gao *et al.*, “Machine tool calibration: Measurement, modeling, and compensation of machine tool errors,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 187, p. 104017, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2023.104017.
- [18] D. Dalalah, “Evaluation of gauges in measurement systems,” *Production Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 929–945, Dec. 2023, doi: 10.1007/s11740-023-01211-9.
- [19] J. G. Salsbury, *Test Uncertainty*, 2nd ed. Westerville: Mitutoyo America Corporation, 2022.