METODE PENGUKURAN PENYIMPANGAN BALOK SUDUT MENGGUNAKAN *AUTOCOLLIMATOR* DAN *SELF-CALIBRATION ROTARY ENCODER*

MEASUREMENT METHOD OF ANGLE BLOCK DEVIATION USING AUTOCOLLIMATOR AND SELF-CALIBRATION ROTARY ENCODER

Asep Ridwan Nugraha[1], Okasatria Novyanto, dan Nurul Alfiyati
[1] Metrologi Panjang, Pusat Penelitian Metrologi LIPI, Kompleks Puspiptek Serpong Gedung 420, Tangerang, Banten
asep.ridwan.nugraha@lipi.go.id

ABSTRAK

Dalam lingkup metrologi sudut, balok sudut dan poligon termasuk *material artifact standards*. Secara umum, *autocollimator* dan meja indeks yang memiliki akurasi tinggi digunakan untuk menentukan nilai penyimpangan balok sudut dan poligon. Puslit Metrologi-LIPI bekerja sama dengan NMIJ dan NIMT untuk membuat standar sudut baru bernama *self-calibratable rotary encoder*. Di Indonesia, metode pengukuran penyimpangan balok sudut dengan menggunakan *autocollimator* dan standar sudut *self-calibratable rotary encoder* ini belum pernah dilakukan sebelumnya. Pengukuran penyimpangan balok sudut dilakukan sebanyak lima kali pada posisi normal dan posisi kebalikannya pada nominal sudut 10", 5', 30', 5° dan 30°. Pengukuran ini dilakukan di Laboratorium Metrologi Panjang Puslit Metrologi-LIPI pada suhu (20,0 ± 0,3) °C dan kelembapan (50 ± 10) %. Hasil pengukuran ini divalidasi dengan nilai yang diperoleh oleh LNE dan dianalisis dengan menggunakan metode statistik nilai E_n dan *Birge ratio*. Hasil perbandingan menunjukkan pada nominal sudut 10", 30', 5°, dan 30° berada pada rentang nilai yang memenuhi kriteria angka E_n, dengan nilai terbesar E_n 0,88 dan R_B 1,77 pada sudut 30°. Hal ini menunjukkan bahwa metode pengukuran penyimpangan balok sudut menggunakan standar *self-calibratable rotary encoder* telah valid dan juga metode ini mampu meningkatkan ketidakpastian pengukuran sebesar 68,8%.

Kata Kunci: *autocollimator*, balok sudut, metode pengukuran, *rotary encoder,* SelfA47

ABSTRACT

In the field of angle metrology, angle blocks and polygons are the material artifact standards. Conventionally, autocollimator along with precision indexing table are used to determine the deviation of angle blocks and polygons. Research Center for Metrology LIPI in collaboration with NMIJ and NIMT developed a new angle standard called self-calibratable rotary encoder to replace a function of indexing table. In Indonesia, the measurement method of angle blocks deviation using autocollimator along with self-calibratable rotary encoder has never done before. The measurement of angle blocks deviation performed 5 times in normal and inverted position at angle blocks with a nominal 10", 5', 30', 5° and 30°. It was carried out at Length Metrology Laboratory RCM LIPI with room temperature (20.0 ± 0.3)°C and humidity (50 ± 10) %. The results are validated with the value taken by LNE and analyzed using statistical methods En number and Birge ratio. It shows that the nominal angle of 10", 30', 5° and 30° is acceptable to fulfill the criteria of E_n number and Birge ratio test, with the largest value of En 0.88 and R_B 1.77 at nominal angle of 30°. It means that the method is valid and also the uncertainty of measurement is improved up to 68.8%.

Keywords*: autocollimator, angle block, measurement method, rotary encoder, SelfA47*

1. PENDAHULUAN

Balok sudut dan poligon merupakan standar acuan yang penting dalam lingkup metrologi sudut. Kedua standar tersebut banyak digunakan untuk keperluan uji banding antarlembaga metrologi nasional (NMI) dan laboratorium terakreditasi karena mempunyai daya tahan yang tinggi.[1] Seperti halnya poligon, balok sudut dapat dikalibrasi dengan menggunakan metode langsung untuk mendapatkan nilai penyimpangannya.[2] Sistem kalibrasi yang digunakan untuk mengukur penyimpangan balok sudut membutuhkan dua komponen utama, yaitu (1) sebuah mekanisme untuk menghasilkan nominal

sudut yang sebanding dengan nominal sudut yang sedang diukur dan (2) sebuah alat seperti *autocollimator* yang mengukur penyimpangan muka ukur yang tegak lurus terhadap sumbu *autocollimator*.[3] Di Indonesia, pengukuran penyimpangan balok sudut dilakukan menggunakan standar sudut berupa meja putar yang memiliki akurasi tinggi *(index table)* sebagai mekanisme untuk menghasilkan nominal sudut dan *autocollimator* sebagai alat untuk membaca penyimpangannya. Metode ini mempunyai nilai ketidakpastian bentangan sebesar 0,9″.[4] Nilai ketidakpastian ini cukup besar untuk balok sudut karena nilai pengukuran penyimpangan balok sudut akan didiseminasikan ke standar sudut yang ada di bawahnya, seperti *bevel protector* dan *clinometers*.[5]

Oleh karena itu, Puslit Metrologi-LIPI bekerja sama dengan NMIJ—National Metrology Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Japan dan NIMT—National Institute of Metrology Thailand membuat standar sudut *self-calibratable rotary encoder* yang kemudian disebut SelfA47, yaitu suatu standar sudut utama yang terbuat dari *rotary encoder* yang mampu mengeluarkan nilai koreksi pada setiap kelipatan 0,02˚ atau sebanding dengan 72″ untuk rentang pengukuran dari mulai 0˚–360˚. Alat ini digunakan sebagai sebuah mekanisme untuk menghasilkan sudut yang presisi dengan akurasi 0,1″ dan ketidakpastian bentangan 0,3″.[6] Di Indonesia, metode pengukuran penyimpangan balok sudut dengan menggunakan *autocollimator* dan standar sudut SelfA47 ini baru pertama kali dilakukan sehingga sangat penting untuk memvalidasi hasil pengukuran berikut ketidakpastiannya.

Berdasarkan dokumen standar SNI ISO/IEC 17025:2008 tentang persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi, klausul 5.4.5.2, menyatakan bahwa laboratorium harus memvalidasi metode tidak baku, metode yang didesain/dikembangkan laboratorium, metode baku yang digunakan di luar lingkup yang dimaksud dan penguatan *(amplification)* serta metode baku yang dimodifikasi untuk mengonfirmasi bahwa metode itu sesuai dengan penggunaan yang dimaksud. Salah satu upaya untuk memvalidasi sebuah metode pengukuran adalah dengan mengikuti uji banding antarlaboratorium.[7]

Untuk memvalidasi metode pengukuran tersebut, hasil pengukuran yang diperoleh Puslit Metrologi-LIPI akan dilakukan pembandingan dengan hasil pengukuran LNE—*Laboratoire National de Métrologie et d'Essais* (Prancis) yang telah tervalidasi melalui kegiatan uji banding.

Pada makalah ini dijelaskan hasil pengukuran penyimpangan balok sudut yang dilakukan oleh LNE dan Puslit Metrologi-LIPI serta evaluasi ketidakpastiannya. Balok sudut yang digunakan adalah nominal 10", 5', 30', 5°, dan 30° karena mewakili setiap rentang ukur balok sudut mulai dari deg, arcmin, dan arcsec. Sebagai ilustrasi pada pengukuran sudut, jika 1˚ (deg) dibagi menjadi 60 bagian maka akan terbentuk 1' (arcmin), dan 1' (arcmin) jika dibagi lagi 60 bagian maka akan terbentuk 1″ (arcsec). Dengan kata lain, 1 arcmin = 1/60 deg; 1 arcsec = 1/60 arcmin; 1 deg = 60 arcmin = 3.600 arcsec.

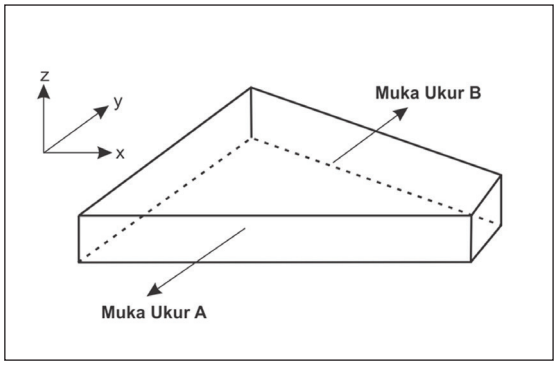
2. TEORI DASAR

2.1 Balok Sudut (*Angle Block*)

Balok sudut merupakan salah satu standar pengukuran sudut yang umum digunakan oleh para praktisi industri dan labolatorium kalibrasi.[8] Balok sudut terbuat dari baja dan pada salah satu ujungnya membentuk sudut tertentu. Pada badannya tertera nominal sudut dan merek pembuatnya. Balok sudut tersedia dalam satu set yang terdiri dari sejumlah balok dengan nominal sudut yang berbeda. Pada dasarnya balok sudut adalah poligon yang mempunyai dua muka ukur. Tiap-tiap muka ukur berukuran 50×8 mm.

Seperti halnya poligon, balok sudut mempunyai kesalahan piramida. Kesalahan piramida adalah suatu kesalahan/*error* yang disebabkan oleh *non-alignment* antara muka ukur balok sudut dalam arah sumbu y, baik disebabkan ketidaksempurnaan dalam pembuatan balok sudut maupun *misalignment* pada *set-up* pengukuran penyimpangan balok sudut sehingga kesalahan piramida ini harus diminimalkan.[1, 9]

Selain itu, balok sudut mempunyai sifat melekat (*wringing*) dengan baik. Sifat tersebut



Gambar 1. Ilustrasi Muka Ukur Balok Sudut yang Dibaca oleh *Autocollimator* pada Pengukuran Awal (α) dan Akhir (β)

sangat dekat hubungannya dengan kualitas permukaan. Salah satu indikator bahwa balok sudut mempunyai kualitas permukaan yang baik, yaitu mampu memantulkan cahaya (bersifat reflektor) sehingga balok sudut dapat dikalibrasi dengan menggunakan *autocollimator*.[10]

Pengukuran penyimpangan balok sudut dilakukan dengan menggunakan *autocollimator* dan meja putar yang memiliki akurasi tinggi sebagai standar sudut. Balok sudut diletakkan secara melintang di atas meja putar dan muka ukurnya tegak lurus terhadap sumbu *autocollimator*. Untuk mengurangi dampak kesalahan piramida, ketegaklurusan balok sudut diatur sedemikian rupa hingga kurang dari 1 arcsec.[11] Selanjutnya salah satu muka ukur ditentukan sebagai posisi awal pengukuran, misalnya muka ukur A, kemudian meja putar diputar 180˚ hingga muka ukur yang lain terbaca oleh *autocollimator*, disebut muka ukur B, seperti pada Gambar 1.

Nilai penyimpangan dari nominal balok sudut didefinisikan sebagai selisih pembacaan *autocollimator pada* kedua muka ukur balok sudut. Secara matematis dirumuskan dengan:

$$E = \beta - \alpha \quad \text{.....(1)}$$

dengan:

E = penyimpangan dari nominal balok sudut

α = nilai pembacaan *autocollimator* pada posisi pengukuran awal

β = nilai pembacaan *autocollimator* pada posisi pengukuran akhir[11]

2.2 Distribusi Statistik : E_n *Number* dan *Birge Ratio*

Hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengecek korelasi hasil uji banding antara kedua laboratorium. Nilai hasil pengukuran dianggap menyimpang secara signifikan atau *outlier* jika nilai E_n yang diperoleh lebih besar dari 1 (satu).

Untuk menghitung nilai E_n, dibutuhkan suatu nilai referensi uji banding dari seluruh nilai peserta. Misalkan, jumlah peserta yang mengikuti uji banding ini adalah I. Setiap laboratorium melaporkan nilai terukur, x_i, ketidakpastian bakunya, $u(x_i)$. Oleh karena itu, nilai pembobotan ternormalisasi, w_i, dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$w_i = C\frac{1}{\left[u\left(x_i\right)\right]^2} \quad \text{.....(2)}$$

di mana nilai faktor normalisasi, C, ditentukan dengan:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{I}\left(\frac{1}{u\left(x_i\right)}\right)^2} \quad \text{.....(3)}$$

maka nilai rata-rata pembobotan, $\overline{x}_w$ adalah

$$\overline{x}_w = \sum_{i=1}^{I} w_i \cdot x_i \quad \text{.....(4)}$$

Nilai rata-rata pembobotan ini akan digunakan sebagai nilai referensi uji banding (*Key Comparison Reference Value*—KCRV) dan ketidakpastian dari nilai referensi ini dihitung sebagai standar deviasi internal. Standar deviasi internal berasal dari estimasi ketidakpastian baku yang dilaporkan oleh seluruh peserta uji banding, seperti pada persamaan di bawah ini.

$$u_{\text{int}}\left(\overline{x}_w\right) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^{I}\left(\frac{1}{u\left(x_i\right)}\right)^2}} = \sqrt{C} \quad \text{.....(5)}$$

Standar deviasi eksternal dihitung berdasarkan persamaan di bawah ini, dengan I adalah jumlah peserta.

$$u_{ext}\left(\bar{x}_w\right)=\sqrt{\frac{1}{(I-1)}\cdot\frac{\sum_{i=1}^{I}w_i\left(x_i-\bar{x}_w\right)^2}{\sum_{i=1}^{I}w_i}} \quad \text{.....(6)}$$

Setelah menurunkan nilai rata-rata pembobotan dan ketidakpastian dari rata-rata pembobotan, nilai penyimpangan dari setiap hasil pengukuran laboratorium terhadap nilai penyimpangan rata-rata pembobotan ditentukan oleh persamaan $\left(x_i-\bar{x}_w\right)$. Ketidakpastian dari persamaan ini dihitung berdasarkan kombinasi dari ketidakpastian baku peserta $u\ (x_i)$ dan ketidakpastian dari rata-rata pembobotan $u\left(\bar{x}_w\right)$. Ketidakpastian penyimpangan dari rata-rata pembobotan ditunjukkan oleh persamaan (7) yang meliputi tanda minus untuk memperhitungkan korelasi antara dua ketidakpastian dan tanda *plus* jika berkaitan dengan ketidakpastian berkorelasi, seperti ketika membandingkan data dari dua laboratorium yang terpisah.

$$u_{ext}\left(x_i-\bar{x}_w\right)=\sqrt{\left[u\left(x_i\right)\right]^2-\left[u_{\text{int}}\left(\bar{x}_w\right)\right]^2} \quad \text{.....(7)}$$

Untuk menentukan nilai referensi uji banding kunci (KCRV), konsistensi statistik dari hasil kontribusi KCRV diperlukan. Pengecekan terhadap konsistensi statistik dari hasil pengukuran dengan ketidakpastian bakunya dapat diketahui dengan menghitung nilai E_n untuk setiap laboratorium. Nilai E_n didefinisikan sebagai rasio deviasi dari rata-rata pembobotan dibagi dengan ketidakpastian bentangan dari nilai deviasi ini. Nilai ketidakpastian bentangan didapat dengan mengalikan nilai k yang sesuai untuk mendapatkan tingkat kepercayaan 95%.

$$E_n=\frac{x_i-\bar{x}_w}{\sqrt{\left[u\left(x_i\right)\right]^2-\left[u_{\text{int}}\left(\bar{x}_w\right)\right]^2}} \quad \text{.....(8)}$$

Semua hasil perhitungan nilai E_n-nya diperiksa dan setiap nilai $|\ E_n\ | > 1$ dianggap sebagai hasil yang *outlier*.

Di dalam studi statistik, metode yang digunakan untuk menginvestigasi konsistensi nilai pengukuran semua laboratorium dinamakan *Birge ratio*, R_B. *Birge ratio* ini membandingkan nilai penyebaran data hasil pengukuran dengan sebaran data yang diharapkan dari semua laporan ketidakpastian peserta. Konsistensi dalam *Birge ratio* berarti hasil pengukuran semua *peserta* $x_1, \ldots, x_n$ dan ketidakpastian baku $u(x_1), \ldots, u(x_n)$ tepat terhadap model *Birge ratio* dan tidak konsisten, artinya hasil pengukuran dan ketidakpastian bakunya mempunyai perbedaan di beberapa hasil pengukuran yang dilakukan oleh peserta.[1] Penerapan algoritma *least squares* dan tes χ^2 mengarah pada *Birge ratio* yang dihitung menggunakan persamaan (5) dan (6) sehingga dapat dituliskan sebagai berikut.

$$R_B=\frac{u_{ext}\left(\bar{x}_w\right)}{u_{\text{int}}\left(\bar{x}_w\right)} \quad \text{.....(9)}$$

Birge ratio mempunyai nilai ekspektasi sebesar $E(R_B^2) = 1$, ketika hasil pengukuran $x_1, \ldots, x_n$ dan ketidakpastian baku $u(x_1), \ldots, u(x_n)$ semua peserta tidak ada perbedaan yang signifikan. Untuk nilai cakupan sebesar k=2, nilai ekspektasi ini meningkat dan data pada hasil komparasi konsisten dengan ketentuan

$$R_B < \sqrt{1+\sqrt{\frac{8}{(I-1)}}} \quad \text{.....(10)}$$

di mana I adalah jumlah peserta, untuk I=2, nilai $R_B < 1{,}96$ menunjukkan konsistensi hasil pengukuran yang dianggap baik. Dengan kata lain, sebaran data berada dalam cakupan rentang kesalahannya.[12]

2.3 Evaluasi Ketidakpastian

Acuan utama dalam mengevaluasi ketidakpastian pengukuran adalah metode ISO GUM yang dituangkan dalam *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.[13] Dalam perhitungan ketidakpastian pengukuran, menentukan model matematis merupakan persyaratan utama. Jika penyimpangan dari nominal balok sudut dinyatakan dengan:

$$E=\beta-\alpha \quad \text{.....(11)}$$

untuk

$$\theta=\beta-\alpha \quad \text{.....(12)}$$

maka

$$E = \theta \quad \text{.....(13)}$$

dengan :

$E =$ penyimpangan dari nominal balok sudut

$\theta =$ penyimpangan sudut

Dengan penyimpangan sudut yang menyatakan sebagai fungsi dari input kuantitas, θ_i

$$E = f(\theta_i) \quad \text{.....(14)}$$

sehingga persamaan ketidakpastian kalibrasi balok sudut dengan *rotary encoder* dirumuskan:

$$u_c^2(E) = \sum_{i-1}^{n} c_i^2 u^2(\theta i) \quad \text{.....(15)}$$

bila

$$c_i = \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = 1 \quad \text{.....(16)}$$

Dengan demikian, ketidakpastian gabungan dari penyimpangan balok sudut adalah:

$$u_c(E) = \sqrt{u^2(\theta_1) + u^2(\theta_2) + u^2(\theta_3) + u^2(\theta_4) + u^2(\theta_5) + u^2(\delta A_f) + u^2(\delta A_p) + u^2(\delta A_e)} \quad \text{.....(17)}$$

dengan:

$u_c(E) =$ ketidakpastian gabungan

$u(\theta_1)$ = ketidakpastian dari keberulangan pembacaan *autocollimator*

$u(\theta_2)$ = ketidakpastian dari daya baca *autocollimator*

$u(\theta_3)$ = ketidakpastian dari nilai dari sertifikat *autocollimator*

$u(\theta_4)$ = ketidakpastian dari kesalahan elektronik pada *autocollimator*

$u(\theta_5)$ = ketidakpastian dari daya baca meja putar

$u(\theta_6)$ = ketidakpastian dari meja putar

$u(\delta A_f)$ = ketidakpastian dari kerataan muka

$u(\delta A_p)$ = ketidakpastian dari kesalahan piramida

$u(\delta A_e)$ = ketidakpastian dari eksentrisitas[11]

3. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, pengukuran dilakukan terhadap lima balok sudut dengan nominal 10”, 5’, 30’, 5°, dan 30°. Bentuk fisik dari balok sudut dijelaskan dalam Gambar 2 dan Tabel 1. Metode pengukuran balok sudut menggunakan *autocollimator* DA400 dengan serial number 142/78-IP.197 dari Taylor Hobson dan SelfA47 dengan serial number SN001 (SN001-1) sebagai standar yang tertelusur ke SI melalui Puslit Metrologi-LIPI. Metode pengukuran penyimpangan balok sudut dengan menggunakan kedua standar sudut di atas baru pertama kali digunakan di Indonesia sehingga validasi ini penting dilakukan untuk menjamin ketertelusuran pengukuran sudut di Indonesia.

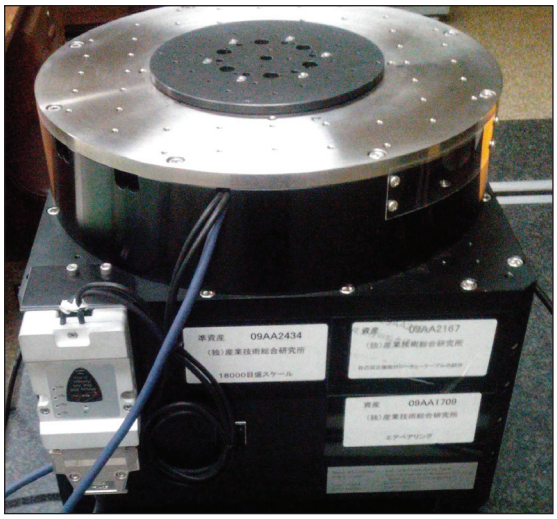
Identifikasi dari semua balok sudut ada pada tabel di bawah ini.

SelfA47 adalah suatu standar sudut utama yang terbuat dari *rotary encoder* dengan fungsi swa-kalibrasi. Standar ini dibuat oleh NMIJ.

Tabel 1. Identifikasi Balok Sudut yang akan Dikalibrasi[12]

Identifikasi	Nominal Sudut	Pembuat
LNE-1	10”	KOBA
LNE-1	5’	KOBA
LNE-1	30’	KOBA
LNE-1	5°	KOBA
LNE-1	30°	KOBA

Gambar 2. Gambar dari kotak balok sudut. Ada 25 buah balok sudut, hanya balok sudut nominal 10”, 5’, 30’, 5°, dan 30° yang akan dikalibrasi. Balok sudut yang lainnya tetap disimpan dan dilapisi oleh *grease*.[12]



Gambar 3. Standar Sudut di Puslit Metrologi-LIPI, *self-calibratable rotary encoder* (SelfA47)

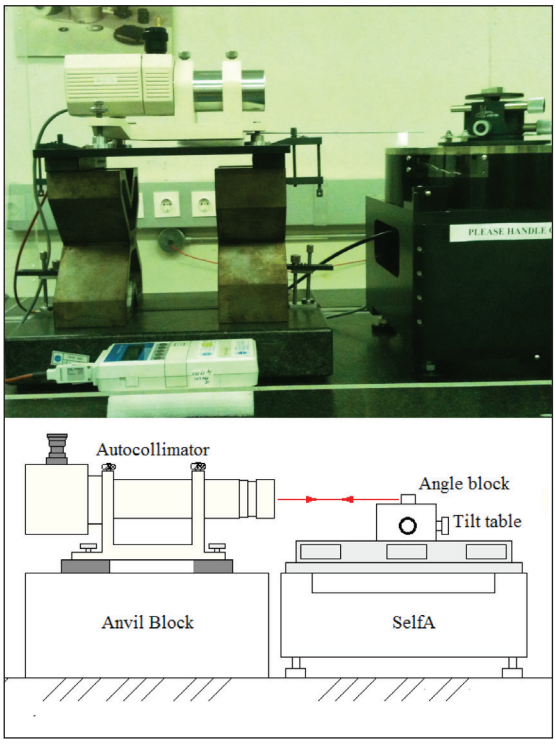
Sistem SelfA47 terdiri dari 10 buah *sensor head* dan 2 buah *rotary scale disc*. *Rotary scale disc* ini mempunyai 18.000 garis graduasi dengan kelipatan skala 20 µm dan rentang ukur sudut terkecil sebesar 72 arcsec. Pengukuran pada SelfA47 dibantu dengan menggunakan *LabView*, sedangkan data hasil pengukuran diolah menggunakan *IGOR Pro Program*.[6, 14]

Sementara *autocollimator* DA400 mempunyai resolusi sebesar 0,1 arcsec dan rentang ± 400 arcsec digunakan untuk membaca penyimpangan sudut dari muka ukur balok sudut.[15].

Skema pengukuran penyimpangan balok sudut dengan *autocollimator* dan standar sudut SelfA47 dapat dilihat pada Gambar 4.

Sebelum pengukuran dimulai, *water level* ditempatkan di atas *tilt table*. Indikator pada *water level* harus tepat berada di tengah sehingga menunjukkan bahwa permukaan *tilt table* rata. Setelah itu, atur posisi *tilt table* setepat mungkin agar eksentrisitas kurang dari 10 µm.

Pengukuran eksentrisitas ini dilakukan agar *tilt table*, balok sudut, dan sumbu putar SelfA47 satu sumbu. Pengukuran eksentrisitas dilakukan dengan menggunakan *level probe* Mahr dengan resolusi 0,01 µm. Kemudian, balok sudut disimpan di atas *tilt table* dan diatur posisinya sehingga mendapatkan nilai ketegaklurusan antara balok sudut dengan *tilt table* kurang dari 1 arcsec.

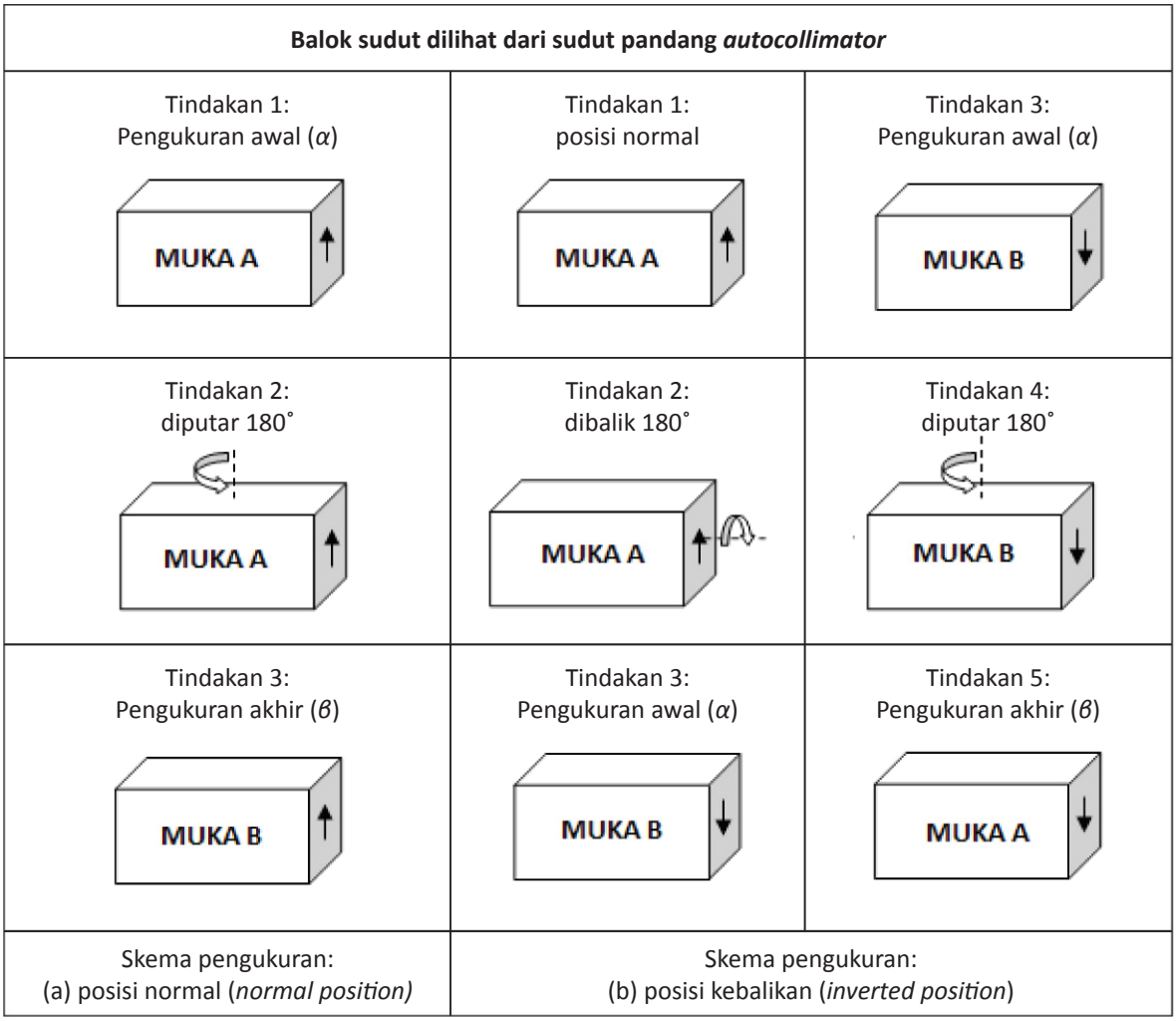


Gambar 4. Skema Pengukuran Penyimpangan Balok Sudut dengan *Autocollimator* dan Standar Sudut SelfA47[11]

Untuk mendapatkan nilai penyimpangan balok sudut (E), balok sudut diukur pada dua posisi berbeda, yaitu posisi normal *(normal position)* dan posisi kebalikannya *(inverted position)* seperti ilustrasi pada Gambar 5. Setiap posisi pengukuran dilakukan sebanyak lima kali baik pada posisi normal maupun pada posisi kebalikan, terdapat lima buah nilai penyimpangan balok sudut (E_1 ... E_5) yang terdiri dari pengukuran awal (α_1 ... α_5) dan pengukuran akhir (β_1 ... β_5). Nilai penyimpangan balok sudut pada kedua posisi ini dirata-ratakan sehingga didapat nilai rata-rata penyimpangan balok sudut. Rata-rata penyimpangan balok sudut ini dibandingkan dengan pengukuran LNE untuk setiap nominal. Efek kesalahan elektronik dari pembacaan *autocollimator* DA400 dapat diminimalkan dengan mengambil rata-rata pembacaan oleh *autocollimator* dengan waktu tunggu sebesar dua detik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran penyimpangan balok sudut yang dilakukan oleh Puslit Metrologi-LIPI ditunjukkan dalam Tabel 2. Semua pengukuran



Gambar 5. Pengukuran penyimpangan balok sudut (E) pada (a) posisi normal (*normal position*) dan (b) posisi kebalikan (*inverted position*).

dilakukan di Laboratorium Metrologi Panjang pada suhu (20,0 ± 0,3) °C dan kelembapan (50 ± 10) %. Pada Tabel 2, pengukuran dilakukan pada posisi normal dan posisi kebalikan masing-masing sebanyak lima kali. Nilai rata-rata penyimpangan balok sudut diperoleh dengan merata-ratakan nilai pengukuran penyimpangan balok sudut pada posisi normal (E_1 ... E_5) dan posisi kebalikannya (E_6 ... E_{10}). Kemudian, nilai rata-rata penyimpangan balok sudut ini dibandingkan dengan hasil pengukuran LNE.

Hasil pengukuran penyimpangan balok sudut yang dilakukan oleh LNE ditunjukkan pada Tabel 3. LNE menggunakan *autocollimator* ELCOMAT HR dari MÖLLER-WEDEL yang mempunyai resolusi tinggi, yaitu 0,005 arcsec dengan rentang ± 300 arcsec dan standar sudut yang dikembangkan sendiri oleh LNE terbuat dari dua buah *rotary encoder* RON905 dari Heidenhain yang terpasang secara berlawanan arah dan mampu bergerak dengan kecepatan sudut sebesar 30 rpm. Selain itu, LNE menggunakan *platen* sebagai alas permukaan ukur balok sudut yang dijamin nilai kerataannya. Sebagai laboratorium acuan, LNE melakukan dua kali pengukuran. Pengukuran dilakukan pada suhu (20,0 ± 0,1) °C dan kelembapan (45 ± 5) %. Kedua hasil pengukuran menunjukkan bahwa balok sudut dalam keadaan stabil, tidak ada kesalahan *drift* akibat pengiriman. Berdasarkan protokol teknis uji banding, diharuskan untuk melaporkan ketidakpastian dengan faktor cakupan k=1 dalam satuan arcsec.[12]

Pada Tabel 3, hasil pengukuran oleh Puslit Metrologi-LIPI mempunyai perbedaan dengan LNE. Secara umum, perbedaan ini terjadi karena adanya kesalahan eksentrisitas dan kesalahan piramida. Kesalahan eksentrisitas terjadi karena

balok sudut, *tilt table,* dan meja putar tidak berada pada sumbu rotasi yang sama. Ketika meja putar berputar, posisi balok sudut dan *tilt table* tidak berada pada posisi yang seharusnya sehingga mengakibatkan kesalahan sebesar 0,2 arcsec untuk nilai eksentrisitas yang lebih dari 10 μm.[1]

Kesalahan piramida terjadi akibat *setting alignment* balok sudut tidak sempurna. Muka ukur balok sudut tidak tegak lurus dengan sumbu rotasi meja putar sehingga ketika balok sudut diputar 180˚, terbentuklah sudut antara muka ukur A dan muka ukur B, akibatnya terjadi penyimpangan. Nilai penyimpangan ini diestimasi sebesar 1 arcsec untuk rentang ±400 arcsec pada *autocollimator*.[1] Selain itu, faktor-faktor lain yang memengaruhi perbedaan pengukuran ini dapat berasal dari ketidakrataan permukaan ukur balok sudut, ketidakrataan permukaan *tilt table* sehingga membuat perbedaan pembacaan posisi normal dan posisi kebalikan.

Pada Tabel 3, ketidakpastian pengukuran LNE sama untuk semua nominal, yaitu sebesar 0,1 arcsec, sedangkan untuk Puslit Metrologi-LIPI nilai ketidakpastian pengukuran bernilai 0,28 arcsec dengan faktor cakupan sebesar k=2 pada nominal sudut 10”, 30’, 5°, dan 30°. Nilai ketidakpastian pengukuran yang diperoleh ini lebih kecil nilainya jika dibanding dengan ketidakpastian pengukuran menggunakan standar sudut meja indeks, yaitu 0,9 arcsec dengan faktor cakupan sebesar k=2. Dengan demikian, metode pengukuran yang menggunakan standar sudut SelfA47 mampu meningkatkan nilai ketidakpastian sebesar 68,8%.

Berdasarkan persamaan (17) ada delapan komponen utama yang berkontribusi besar pada nilai ketidakpastian pengukuran (3). Nilai ketidakpastian pengukuran dari standar *autocollimator DA 400* mempunyai kontribusi yang paling besar yaitu 47% (0,009025 arcsec), kemudian nilai kompensasi meja rotasi (SelfA47) serta perbedaan posisi normal dan kebalikan masing-masing mempunyai kontribusi sebesar 18% (0,003333 arcsec) dan 17% (0,003223 arcsec). Sedangkan, nilai keberulangan mempunyai kontribusi sebesar 8%. Nilai ini mencerminkan kondisi dan performa alat untuk menghasilkan nilai yang sama pada titik yang sama. Nilai ini berbeda-beda tergantung kondisi alatnya. Pada *autocollimator* yang presisi, nilai keberulangannya mendekati akurasi dari alat tersebut.[16] Nilai ketidakpastian baku dari kesalahan piramida mempunyai nilai paling besar yaitu 0,5774 arcsec. Akan tetapi, karena koefisien sensitivitasnya bernilai 0,05 sehingga kontribusi nilai kesalahan piramida pada ketidakpastian pengukuran penyimpangan balok sudut ini adalah 4% (0,000833 arcsec).

Tabel 2. Hasil Pengukuran Penyimpangan dari Nominal Balok Sudut (E) yang Diukur oleh Puslit Metrologi-LIPI pada Posisi Normal dan Posisi Kebalikan dalam Arcsec (“) untuk Setiap Balok Sudut

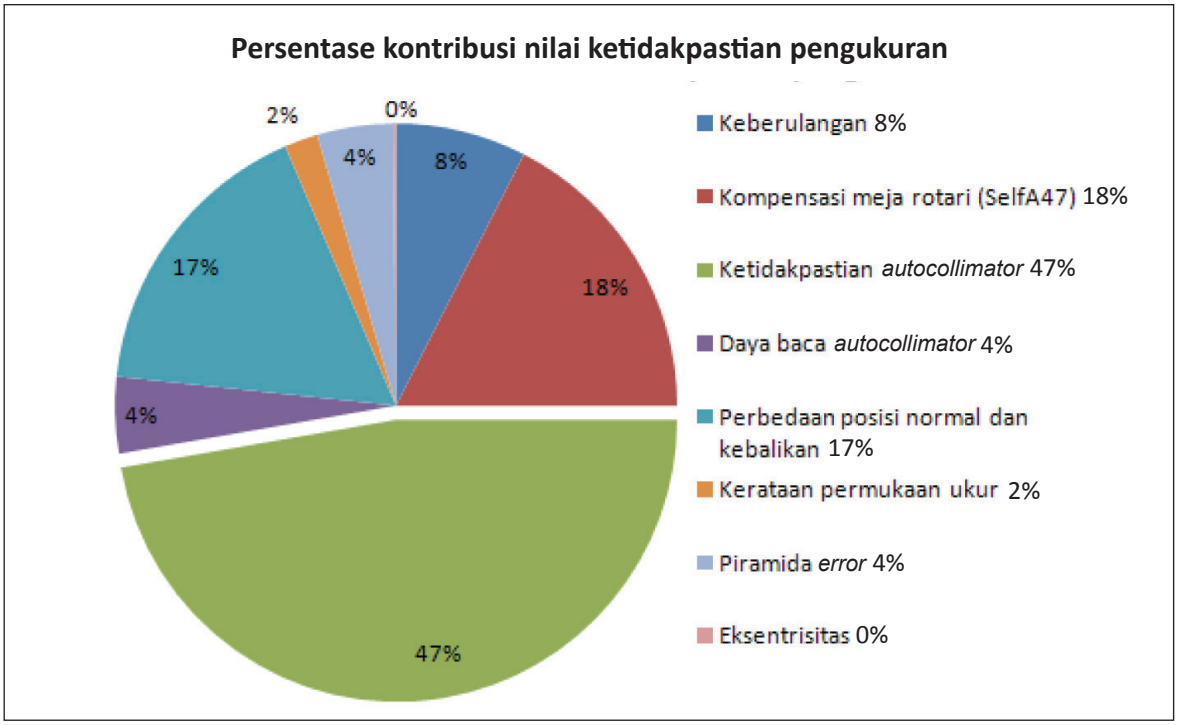
Nominal Sudut	Posisi Normal (*Normal Position*)					Posisi Kebalikan (*Inverted Position*)					Rata-rata (*E*)
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	
10”	1,04	0,87	1,06	1,18	1,05	0,96	0,97	0,84	0,92	0,98	0,99
5’	-1,43	-1,53	-1,67	-1,58	-1,74	-0,67	-0,61	-0,46	-0,48	-0,35	-1,05
30’	0,21	0,12	0,04	0,16	0,34	0,01	-0,02	0,05	-0,09	-0,02	0,05
5°	-1,58	-1,89	-0,90	-0,51	-0,85	1,29	1,12	0,66	0,70	0,90	-0,11
30°	1,73	1,72	1,49	1,45	1,46	-2,87	-2,70	-2,82	-2,83	-3,15	-0,65

Tabel 3. Perbandingan Nilai Penyimpangan dari Nominal Balok Sudut (E) Diukur oleh Puslit Metrologi-LIPI dan LNE dengan Ketidakpastian Baku (k=1) (u) dalam Arcsec (“) untuk Setiap Balok Sudut

Peserta	Balok sudut 10”		Balok sudut 5’		Balok sudut 30’		Balok sudut 5°		Balok sudut 30°	
	E (“)	u (“)	*E* (“)	u (“)	*E* (“)	u (“)	*E* (“)	u (“)	*E* (“)	u (“)
LNE 1	0,79	0,1	-2,03	0,1	-0,17	0,1	0,04	0,1	-0,36	0,1
METROLOGI	0,99	0,14	-1,05	0,36	0,05	0,14	-0,11	0,14	-0,65	0,13
LNE 2	0,75	0,1	-2,02	0,1	-0,13	0,1	0,09	0,1	-0,34	0,1

Analisis ketidakpastian pengukuran penyimpangan balok sudut lebih lengkap ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 4 di bawah ini.

Untuk memvalidasi hasil pengukuran penyimpangan balok sudut ini, dilakukan mekanisme uji banding dengan cara membandingkan nilai dan ketidakpastian pengukuran oleh RCM LIPI dan LNE. Penentuan nilai referensi uji banding (KCRV) dihitung sebagai rata-rata



Gambar 6. Persentase Kontribusi Tiap-tiap Komponen pada Nilai Ketidakpastian Pengukuran Penyimpangan Balok Sudut

Tabel 4. Komponen Sumber Ketidakpastian Pengukuran Penyimpangan Balok Sudut Puslit Metrologi-LIPI

Sumber Ketidakpastian	Satuan	Tipe Dist.	Interval Var. (arcsec)	Pembagi	Derajat Kebebasan	Ketidakpastian Baku (arcsec)	Koef. Senst	(ui . ci)^2	(ui . ci)^4 / v
Keberulangan (θ_1)	"	Tipe A	0,12	3,162	9	0,0379	1	0,001440	2,304E-07
Kompensasi meja rotari (SelfA) (θ_2)	"	Segi-4	0,1	1,732	200	0,0577	1	0,003333	5,556E-08
ketidakpastian *autocollimator* (θ_3)	"	Normal	0,19	2	200	0,0950	1	0,009025	4,073E-07
Daya baca *autocollimator* (θ_4)	"	Segi-4	0,05	1,732	1000	0,0289	1	0,000833	6,944E-10
Perbedaan posisi normal dan kebalikan (δ_{Ad})	"	Segi-4	0,10	1,732	50	0,0568	1	0,003223	2,078E-07
Kerataan permukaan ukur (δ_{Af})	µm	Segi-4	0,095	1,732	13	0,0548	0,35	0,000369	1,086E-08
Piramida *error* (δ_{Ap})	"	Segi-4	1	1,732	13	0,5774	0,05	0,000833	5,556E-08
Eksentrisitas (δ_{Ae})	mm	Segi-4	0,2	1,732	13	0,1155	0,05	0,000033	8,889E-11
				Ketidakpastian gabungan, u_c				0,14"	
				Derajat kebebasan efektif, v_{eff}					376
				Ketidakpastian bentangan pada k = 2, U_{95}				0,28"	

pembobotan *(weighted mean)* dari hasil seluruh peserta uji banding, dalam hal ini adalah RCM LIPI dan LNE[12]. Analisis data untuk setiap pengukuran menggunakan persamaan (4), (5), (8), dan (9) dengan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Nilai $\overline{x}_w$ merupakan nilai referensi dalam uji banding ini dengan ketidakpastian pengukuran $u(\overline{x}_w)$. Hasil perhitungan menunjukkan nilai ketidakpastian pengukuran $u(\overline{x}_w)$ lebih mendekati nilai ketidakpastian pengukuran oleh LNE, yaitu 0,096 arsec pada sudut 5' dan 0,08 arcsec pada sudut 10", 30', 5°, dan 30°.

Berdasarkan Tabel 6, hasil validasi menunjukkan bahwa pengukuran yang dilakukan oleh Puslit Metrologi-LIPI secara keseluruhan mampu memenuhi kriteria dengan nilai E_n<1, kecuali untuk nominal sudut 5'. Angka E_n dan *Birge ratio* mempunyai nilai terbesar pada sudut 30° dengan nilai E_n 0,88 dan R_b 1,77. Hasil pengukuran pada keempat nominal tersebut menunjukkan bahwa Puslit Metrologi-LIPI mampu melakukan pengukuran penyimpangan balok sudut dan metode pengukuran penyimpangan balok sudut dengan menggunakan *autocollimator* dan standar sudut SelfA47 telah valid.

Pada pengukuran penyimpangan balok sudut 5' angka E_n dan *Birge ratio* tidak memenuhi kriteria. Hal ini berarti terjadi perbedaan hasil pengukuran sehingga mengakibatkan gagal memenuhi kriteria angka E_n dan *Birge ratio*[17]. Nilai hasil pengukuran dan ketidakpastian pengukuran Puslit Metrologi-LIPI mempunyai kontribusi besar terhadap penentuan nilai dan ketidakpastian referensi. Dengan demikian, pada nominal ini, nilai referensi bergeser ke nilai yang lebih besar.

Grafik pada Gambar 7 mengilustrasikan hasil pengukuran Puslit Metrologi-LIPI dan LNE dengan ketidakpastian gabungan k=1. Garis putus-putus menunjukkan nilai referensi dari setiap nominal, sedangkan garis tebal menunjukkan ketidakpastian dari nilai referensi tersebut. Berdasarkan pada Tabel 6, nilai pengukuran Puslit Metrologi-LIPI yang memenuhi kriteria statistik angka E_n adalah balok sudut nominal 10", 30', 5°, dan 30°.

Perbedaan nilai kesalahan terbesar hasil pengukuran penyimpangan balok sudut terhadap nilai referensi uji banding adalah 0,91 arcsec berada pada nominal 5', sedangkan perbedaan nilai kesalahan yang paling mendekati nilai referensi uji banding adalah pada nominal 5° dengan perbedaan nilai 0,10 arcsec.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

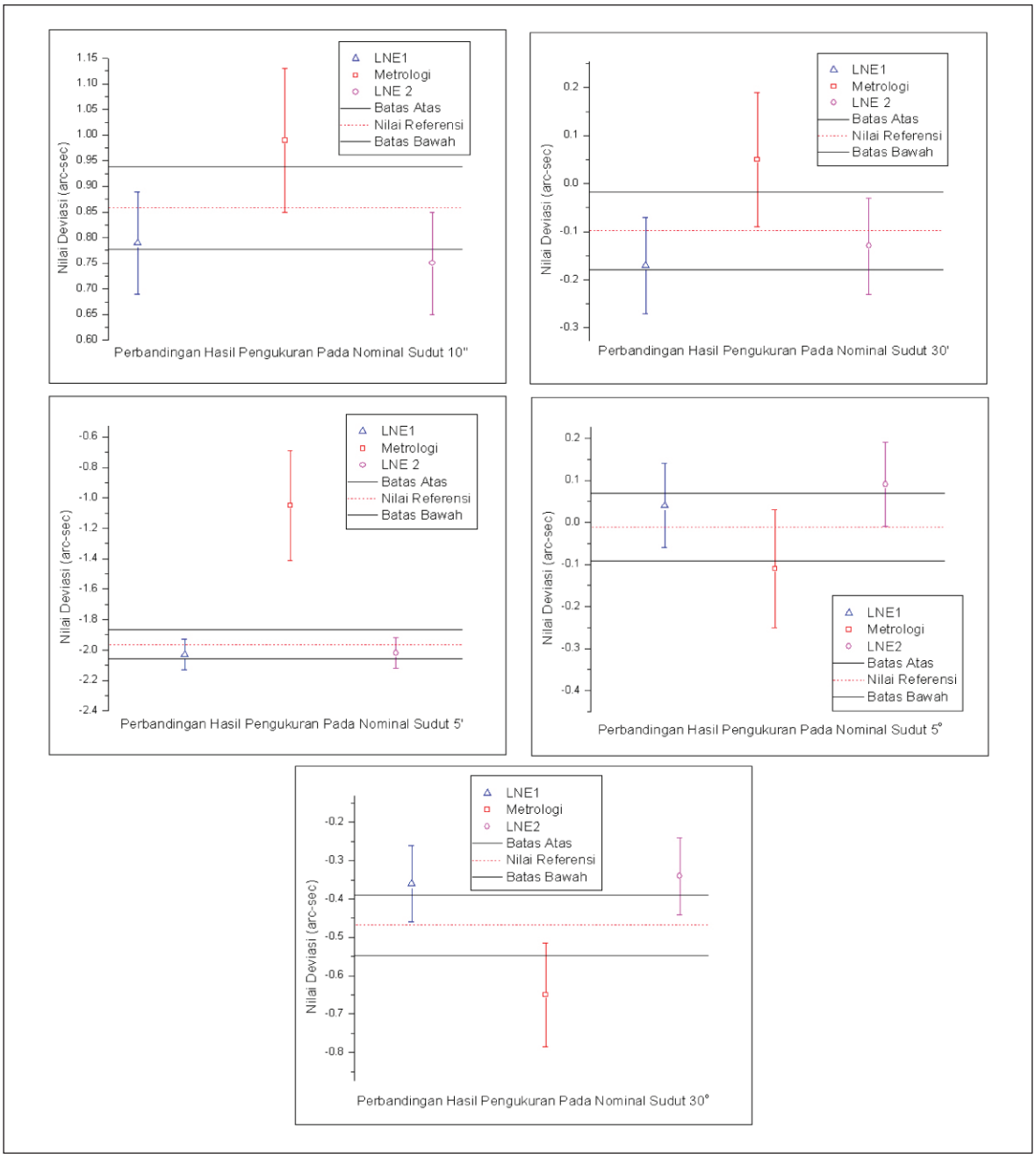
Hasil perbandingan antara LNE dan Puslit Metrologi-LIPI menunjukkan pada nominal sudut 10", 30', 5°, dan 30° berada pada rentang nilai yang memenuhi kriteria nilai E_n dan *Birge*

Tabel 5. Nilai Referensi Uji Banding Kunci (*Key Comparison Reference Value*—KCRV) $\overline{x}_w$ dan Nilai Ketidakpastian Rata-rata Pembobotan $\overline{x}_w$, *Birge ratio*

	Nilai Nominal Balok Sudut				
	10"	5'	30'	5°	30°
$\overline{x}_w$ (")	0,858	-1,960	-0,096	-0,011	-0,468
$u(\overline{x}_w)$(")	0,081	0,096	0,081	0,081	0,079

Tabel 6. Validasi Nilai Pengukuran Puslit Metrologi-LIPI Dibanding dengan Nilai Referensi Uji Banding (KCRV)

Nominal	Nilai Pengukuran		Ketidakpastian Pengukuran		Nilai E_n	Nilai R_b
Sudut	RCM-LIPI	KCRV	RCM-LIPI	KCRV	RCM-LIPI	
10"	0,99	0,858	0,14	0,095	0,58	1,16
5'	-1,05	-1,960	0,36	0,253	1,31	2,62
30'	0,05	-0,096	0,14	0,104	0,64	1,28
5°	-0,11	-0,011	0,14	0,071	0,44	0,87
30	-0,65	-0,488	0,13	0,140	0,88	1,77



Gambar 7. Hasil pengukuran penyimpangan balok sudut oleh Puslit Metrologi-LIPI dan LNE untuk semua balok sudut dalam satuan arcsec. *Error bar*: Menunjukkan ketidakpastian gabungan (k=1).

ratio test, dengan nilai terbesar E_n 0,88 dan R_B 1,77 pada nominal sudut 30°. Begitu juga dengan nilai ketidakpastian pengukurannya, nilai ketidakpastian pengukuran menggunakan standar sudut SelfA47 telah memenuhi persyaratan. Hasil pengukuran pada keempat nominal tersebut menunjukkan bahwa Puslit Metrologi-LIPI mampu melakukan pengukuran penyimpangan balok sudut dan metode pengukuran penyimpangan balok sudut dengan menggunakan standar sudut SelfA47 telah valid. Selain itu, metode ini mampu meningkatkan ketidakpastian pengukuran secara signifikan, yaitu sebesar 68,8%.

Pengukuran penyimpangan balok sudut yang dilakukan pada nominal sudut 5' mempunyai nilai-nilai E_n dan *Birge ratio* yang tidak memenuhi kriteria. Oleh karena itu, perlu dilakukan investigasi pada saat pengukuran penyimpangan balok sudut nominal 5' untuk mengetahui kesalahan apakah bersumber dari

standar yang digunakan, *setting alignment* yang tidak tepat, metode pengukuran, kerataan permukaan, atau kesalahan geometris dari artefak uji banding.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada *EU-Indonesia Trade Support Programme II* yang telah mengadakan kegiatan pelatihan dan uji banding untuk meningkatkan kapabilitas Puslit Metrologi-LIPI dalam hal pengukuran. Selain itu, ucapan terima kasih penulis berikan kepada semua kolega dari laboratorium metrologi panjang Puslit Metrologi-LIPI dan LNE atas arahan, diskusi, dan kerja sama bilateralnya.

7. DAFTAR PUSTAKA

[1] Kruger, O. 2000. "Methods for Determining the Effect of Flatness Deviations, Eccentricity and Pyramidal Errors on Angle Measurements." *Metrologia* 37: 101.

[2] Sanjid, M. Arif. 2013. "Improved Direct Comparison Calibration of Small Angle Blocks." *Measurement* 46: 646–653, 1.

[3] Stone, J. A., M. Amer, B. Faust, dan J. Zimmerman. 2004. "Uncertainties in Small-Angle Measurement Systems Used to Calibrate Angle Artifacts." *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* 109.

[4] Novyanto, O. dan N. Alfiyati. 2014. "Laporan Hasil Kalibrasi Balok Sudut No Order E-14-07-068." Tangerang Selatan: Puslit Metrologi-LIPI.

[5] Oliveira, J.C.V.d, dan L. H. B. Vieira. 1998. "Traceability Chain and Dissemination of Angle Measurement in Brasil", *Precision Engineering* 22, 141–152.

[6] Watanabe, T., A. P. Drijarkara, W. Samit, K. Vacharanuku, dan A. Tonmueanwai. 2011. "Self-calibratable Rotary Table for Angular Standards." *The 10th International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments*.

[7] BSN. 2008. "SNI ISO/IEC 17025, Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi." ed. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

[8] Novyanto, O. 2012. "Kalibrasi Balok Sudut Non-Reflektor dengan Metode Kontak Menggunakan Analisis Matematik Regresi Linier Sederhana." *Pertemuan dan Presentasi Ilmiah: Kalibrasi, Instrumentasi, dan Metrologi (PPI-KIM)* 38: 248–260.

[9] Moore, W. R. 1970. *Foundations of Mechanical Accuracy*. Bridgeport, Connecticut: The Moore Special Tools Company.

[10] Reeve, C.P. 1980. *The Calibration of Angle Blocks by Intercomparison*. Washington, D.C.: Statistical Engineering Division Center for Applied Mathematics National Bureau of Standards.

[11] Novyanto, O., N. Alfiyati, dan G. Zaid. 2014. Analisa Data dan "Evaluasi Ketidakpastian untuk Kalibrasi Balok Sudut dengan SelfA." Tangerang Selatan: Puslit Metrologi-LIPI.

[12] Salgado, J. 2014. Interlaboratory Comparison Report "EURAMET L-K3.2009.1: Angle Block Bilateral Comparison." France: LNE—Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.

[13] I. Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). 2008. "Evaluation of Measurement Data— Guide to the Expression of Uncertainty in measurement."

[14] Watanabe, T., H. Fujimoto, dan T. Masuda. 2005. Self-calibratable Rotary Encoder. *Journal of Physics: Conference Series.* 240.

[15] Precision, T.H. 2012. *The Autocollimator Range for Measuring Angle, Straightness, Flatness, Squareness, Parallelism*. Leicester: Taylor Hobson Limited.

[16] Tanfer, Y., S. A. Akgoz, dan A. Muharrem. 2014. "Calibration of High-resolution Electronic Autocollimators with Demanded Low Uncertainties Using Single Reading Head Angle Encoders." *Measurement Science and Technology* 25: 015010.

[17] Kacker, R., R. Datla, dan A. Parr. 2002. "Combined Result and Associated Uncertainty from Interlaboratory Evaluations Based on the ISO Guide." *Metrologia* 39: 279.