

SISTEM PENGUKURAN UNTUK MENENTUKAN PENYIMPANGAN SUDUT LEVEL ELEKTRONIK DENGAN MENGGUNAKAN METODE INKLINASI

MEASUREMENT SYSTEM FOR DETERMINING THE ANGLE DEVIATION OF ELECTRONIC LEVEL USING INCLINATION METHOD

Okasatria Novyanto, Asep Ridwan Nugraha, dan Nurul Alfiyati

Pusat Penelitian Metrologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Kompleks Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314
okasatria@kim.lipi.go.id

ABSTRAK

Telah dibuat suatu sistem pengukuran untuk menentukan penyimpangan sudut pada level elektronik dengan menggunakan metode inklinasi. Metode ini menggunakan prinsip trigonometri dengan nilai sumbu x dan y yang diperoleh dari panjang meja inklinasi dan pergerakan *length gauge*. Level elektronik diletakkan di atas meja inklinasi yang searah sumbu x , kemudian diberikan kemiringan tertentu sehingga terjadi perubahan jarak pada sumbu y . Besarnya perubahan jarak tersebut diukur oleh *length gauge*. Perpaduan nilai kedua sumbu ini digunakan untuk mendapatkan besarnya nilai sudut terukur. Hasil tersebut diperbandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan standar sudut swakalibrasi (SelfA47) yang sudah tervalidasi sebagai nilai acuan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh titik sampel pengukuran memenuhi kriteria dengan nilai E_n terbesar berada pada titik $-1.400 \mu\text{m/m}$, yakni 0,62, sedangkan nilai E_n terkecil berada pada titik $700 \mu\text{m/m}$, yakni 0,02. Dengan demikian, secara eksperimental, metode ini dapat diaplikasikan untuk menentukan penyimpangan sudut level elektronik yang memiliki rentang pengukuran hingga $\pm 2.000 \mu\text{m/m}$. Meskipun demikian, hanya 70% saja dari rentang ukur keseluruhan yang disarankan sebagai rentang ukur efektif.

Kata kunci: standar ukur, inklinasi, ketidakpastian, level elektronik, *Birge ratio*, nilai E_n

ABSTRACT

A measurement system has been created for determining angle deviation of electronic level using inclination method. This method uses principle of trigonometry with the value of x and y which are obtained from the length of inclination table and the movement of length gauge respectively. Electronic level is put on the inclination table in x -direction and then it was given a certain slope so that there is a change in distance on the y axis. The amount of change in distance is measured by length gauge. The combination value of two axes is used to get the measured angle. These results are compared with the results of measurements using a self-calibration angle (SelfA47) which already validated as a reference value. The calculation shows that the whole point of measurement are fulfill the criteria of E_n number; the biggest value is at $-1.400 \mu\text{m/m}$ which is 0.62, while the smallest value is at $700 \mu\text{m/m}$ which is 0.02. Thus, experimentally, this method can be applied to determine the angle deviation of electronic level which has a measurement range up to $\pm 2.000 \mu\text{m/m}$. However, only 70% of the overall measuring range suggested as an effective measuring range.

Keywords: measuring standard, inclination, uncertainty, electronic level, *Birge ratio*, E_n value-

A. PENDAHULUAN

Selain laser, *form*, *surface texture*, *line standard*, dan *end standard*, pengukuran sudut merupakan bagian penting dari pengukuran dimensional karena instrumen sudut dapat digunakan untuk *alignment*, *adjustment*, ataupun *leveling*. beberapa kesalahan, seperti *cosine*, *abbe*, dan *start nol*, dapat diminimalisasi.

Salah satu instrumen ukur sudut yang dapat digunakan untuk *leveling* adalah level.^[1,2]

Instrumen ini juga dapat digunakan untuk pengukuran kerataan meja rata.^[3,4] Meja rata banyak digunakan sebagai datum ataupun sebagai bidang alas untuk instrumen ukur lain sehingga level menjadi sesuatu yang dapat digunakan untuk memastikan bahwa landasan kerja berada dalam posisi rata.^[4] Level dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yakni level mekanik dan level elektronik. Pada dasarnya, prinsip kerja kedua jenis level tersebut adalah

sama, yaitu bila diletakkan pada bidang miring akan timbul suatu nilai yang menunjukkan seberapa besar kemiringan tersebut, hanya saja sensor level mekanik berbeda dengan sensor elektronik. Level mekanik menggunakan sifat rata cairan pada sistem gravitasi bumi sebagai acuan kelurusan. Oleh karena itu, gelembung udara digunakan sebagai sensor kelurusannya, sedangkan level elektronik sensornya adalah pendulum.^[5] Umumnya, level mekanik mempunyai resolusi hingga $20\ \mu\text{m/m}$, sedangkan level elektronik memiliki resolusi hingga $1\ \mu\text{m/m}$.

Untuk pengukuran kemiringan sudut kecil (seperti pada meja rata) dapat digunakan level elektronik dengan rentang ukur $\pm 2.000\ \mu\text{m/m}$. Ada beberapa metode maupun peralatan standar untuk memastikan bahwa level elektronik tersebut masih sesuai dengan spesifikasi standar yang relevan, misalnya dengan metode kalibrasi menggunakan *rotary table*.^[6] Metode ini memiliki keakuratan hingga $0,5\ \mu\text{m/m}$ atau sebanding dengan $0,1\ \text{arcsec}$ dan sangat praktis dalam hal penggunaan ataupun waktu yang dibutuhkan.^[7] Namun, analisis sistem pengukuran dengan menggunakan metode ini sangat rumit. Metode lain yang dapat digunakan, yakni menggunakan *sine bar*, di mana level elektronik diletakkan pada sebuah batang yang kemiringannya divariasikan dengan cara mengatur panjang nominal *gauge block*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.^[5,8,9] Prinsip kalibrasi level elektronik dengan menggunakan *rotary table* dan *sine bar* mempunyai beberapa kelemahan. Berdasarkan pengamatan penulis dari *website* CMC KAN, belum ada laboratorium kalibrasi dan industri yang mempunyai standar sudut *rotary table* di Indonesia. Standar sudut *rotary table* merupakan

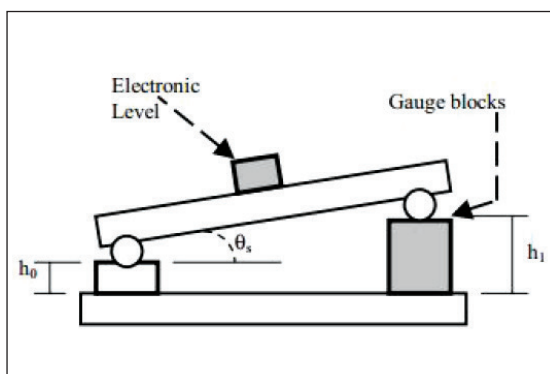
standar sudut yang mempunyai akurasi tinggi sehingga harga standar sudut ini sangat mahal. Sebagian laboratorium kalibrasi dan industri lebih memilih menggunakan *sine bar* untuk kalibrasi elektronik level dibanding dengan menggunakan *rotary table*. Akan tetapi, variasi titik ukur yang dapat dicapai oleh *sine bar* juga sangat terbatas. Hal ini sangat bergantung pada ketersediaan variasi *gauge block* yang digunakan. Skema pengukuran menggunakan *sine bar* dapat diamati pada Gambar 1.

Berdasarkan permasalahan di atas, makalah ini membahas pengembangan suatu sistem pengukuran untuk menentukan penyimpangan sudut level elektronik dengan menggunakan metode inklinasi. Metode ini merupakan solusi bagi laboratorium kalibrasi dan industri yang menginginkan sistem kalibrasi elektronik level yang murah, dapat dibuat atau dikembangkan sendiri, akurasi tinggi, dan mempunyai titik ukur yang bervariasi. Metode ini menggunakan meja inklinasi dengan panjang tertentu dan pangkalnya merupakan titik tumpu yang dapat digerakkan naik turun menggunakan mekanisme ulir. Pergerakan ini diukur dengan menggunakan *length gauge*.

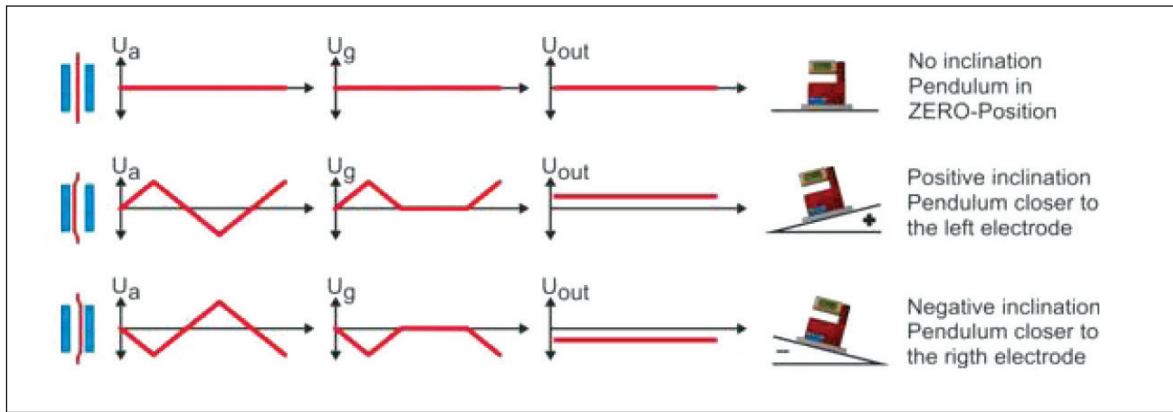
B. TEORI DASAR

1. Sistem Pengukuran Penyimpangan Sudut Level Elektronik dengan Metode Inklinasi

Level elektronik merupakan salah satu standar sudut yang paling banyak digunakan oleh para praktisi industri dan laboratorium kalibrasi. Alat ini menggunakan pendulum sebagai sensor kelurusannya. Bila ada kemiringan, maka posisi pendulum akan bergeser dari pusatnya dan mengakibatkan ketidaksetimbangan tegangan listrik. Ketidaksetimbangan tegangan listrik tersebut kemudian diubah menjadi berbagai sinyal yang proporsional dengan pergeseran pendulum tadi.^[5] Untuk menampilkan nilai pada *display* level elektronik, semua sinyal tersebut harus diubah menjadi besaran sudut. Sudut bernilai positif jika level elektronik berada pada posisi (a) dan bernilai negatif jika level elektronik berada pada posisi (b), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Skema Pengukuran Level Elektronik dengan Menggunakan *Sine Bar*^[9]



Gambar 2. Posisi Penunjukan Level Elektronik^[10]

Umumnya, level elektronik mempunyai resolusi $1 \mu\text{m/m}$ atau sebanding dengan $0,2 \text{ arcsec}$ dengan rentang pengukuran $\pm 2.000 \mu\text{m/m}$. Alat ini mempunyai fungsi untuk mengukur sudut kecil seperti pada kerataan meja rata. Untuk memastikan kebenaran penunjukan pengukuran, level elektronik dapat dikalibrasi dengan menggunakan standar sudut yang mempunyai sifat inklinasi, seperti *rotary table*, *sine bar* dan meja inklinasi.^[10] Meja inklinasi terbuat dari besi cor (*cast iron*) dengan panjang tertentu, pada umumnya 500 mm . Pangkalnya merupakan titik tumpu yang dapat digerakkan naik turun menggunakan mekanisme ulir. Pergerakan ini diukur dengan menggunakan *length gauge*. Pergerakan meja inklinasi ini setara dengan nilai yang ditunjukkan oleh level elektronik. Dalam kaidah fungsi trigonometri, panjang meja inklinasi merepresentasikan variabel x ataupun bisa juga dianggap variabel r , sedangkan panjang pergerakan naik ataupun turun dari meja inklinasi merepresentasikan variabel y . Gabungan dari kedua variabel tersebut akan menghasilkan gradien.^[11] Nilai gradien dari meja inklinasi ini dijadikan sebagai acuan untuk kalibrasi level elektronik. Satuan kemiringan gradien ($\mu\text{m/m}$) mempunyai kesetaraan dengan derajat busur atau lebih dikenal sebagai satuan sudut (arcsec) sehingga penyimpangan sudut level elektronik didefinisikan sebagai selisih antara gradien nilai standar terhadap nilai yang ditunjukkan level elektronik. Secara matematis, penyimpangan sudut level elektronik dirumuskan sebagai persamaan 1.

$$E = R - I$$

$$E = R - \frac{y}{l} \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

E = penyimpangan sudut inklinasi level elektronik

R = pembacaan sudut inklinasi level elektronik sebagai *unit under test*

I = pembacaan sudut meja inklinasi sebagai standar

y = nilai pembacaan *length gauge*

l = panjang meja inklinasi

2. Perhitungan En Number dan Birge Ratio Test

Hasil pengukuran dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengecek korelasi antara hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode inklinasi dan hasil yang diperoleh dengan metode lain yang sudah tervalidasi. Nilai hasil pengukuran dengan metode inklinasi dianggap memenuhi syarat jika nilai E_n yang diperoleh $|E_n| \leq 1$ dan hasil pengukuran dianggap menyimpang secara signifikan atau *outlier* jika nilai E_n yang diperoleh lebih besar dari 1 (satu). Jika nilai E_n semakin mendekati nilai 0, maka hasil uji banding semakin baik atau nilainya semakin dekat dengan laboratorium referensi.^[12,13] Perhitungan nilai E_n diperoleh dari persamaan 2.

$$E_n = \frac{x_{lev,i} - x_{rev,i}}{\sqrt{[U(x_{lev,i})]^2 + [U(x_{rev,i})]^2}} \dots \dots \dots (2)$$

dengan:

$x_{lef,i}$ = Nilai level elektronik pada titik ke- i

$x_{ref,i}$ = Nilai acuan pada titik ke- i

$U(x_{lef,i})$ = Ketidakpastian pengukuran level elektronik pada titik ke- i

$U(x_{ref,i})$ = Ketidakpastian pengukuran nilai acuan pada titik ke- i

Dalam studi statistik, metode yang digunakan untuk menginvestigasi konsistensi nilai pengukuran semua peserta dinamakan *Birge ratio*, R_B . *Birge ratio* ini membandingkan nilai penyebaran data hasil pengukuran dengan sebaran data yang diharapkan dari semua laporan ketidakpastian peserta. *Birge ratio* memiliki nilai ekspektasi sebesar $E(R_B^2) = 1$, ketika hasil pengukuran dan ketidakpastian baku semua peserta tidak memiliki perbedaan yang signifikan.^[12,13] Untuk nilai cakupan sebesar $k = 2$, hasil komparasi konsisten dengan Persamaan 3 sebagai berikut:

$$R_B < \sqrt{1 + \sqrt{8(I-1)}} \dots\dots\dots(3)$$

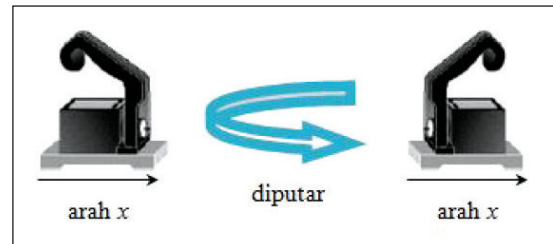
I dalam persamaan tersebut adalah jumlah peserta. Untuk $I = 3$, nilai $R_B < 1,73$ menunjukkan konsistensi hasil pengukuran yang dianggap baik. Dengan kata lain, sebaran data berada dalam cakupan rentang kesalahannya.

C. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, UUT (*unit under test*) yang digunakan adalah level elektronik merek TESA dengan model 05330300, resolusi 1 $\mu\text{m/m}$, dan rentang ukur $\pm 2.000 \mu\text{m/m}$. Standar pengukuran yang digunakan adalah meja inklinasi dari Obishi Keiki dengan panjang 500 mm dan *length gauge* MT2501 dari Heidenhain. Semua standar pengukuran ini tertelusur ke SI melalui Puslit Metrologi LIPI.

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap. Tahap pertama adalah proses persiapan pengukuran, tahap kedua adalah pengukuran, tahap ketiga adalah analisis hasil pengukuran, dan tahap keempat adalah validasi metode.

Tahap pertama merupakan proses persiapan pengukuran yang meliputi pembersihan seluruh alat dan standar yang digunakan, proses stabilisasi suhu, dan penyetelan sistem pengukuran. Proses stabilisasi suhu membutuhkan waktu



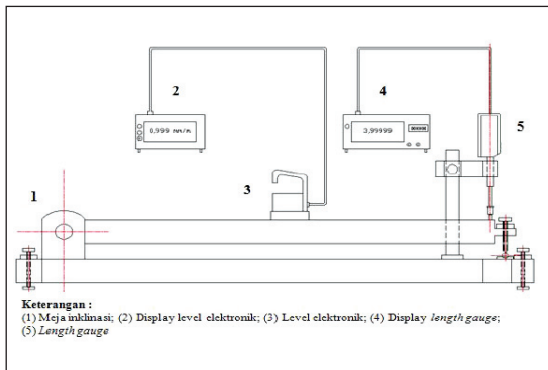
Gambar 3. Pengaturan Titik Nol Level Elektronik

selama satu jam. Penyetelan sistem pengukuran dilakukan dengan cara mengatur penunjukan nol level elektronik (R_0). Pada proses ini, level elektronik diletakkan di atas permukaan meja rata dan menempel pada sisi pelurus. Posisi level elektronik diputar sehingga ujung-ujungnya bertukar tempat, namun tetap di posisi semula di atas meja rata, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Posisi ini dibaca sebagai penunjukan R_1 . *Knob* pada *display* diputar agar nilai penunjukannya menjadi setengah R_1 . Posisi level diputar kembali untuk memastikan penunjukan level elektronik tidak berubah.

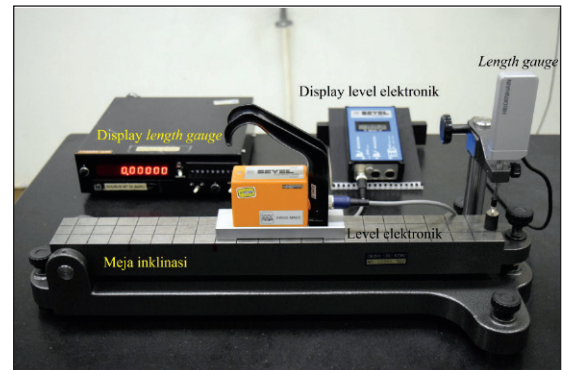
Tahap kedua adalah tahap pengukuran. Pengukuran penyimpangan sudut level elektronik (*unit under test*) dilakukan dengan menempatkan *unit under test* pada batang meja inklinasi, seperti pada Gambar 4 dan 5. Diagram alur pengaturan alat dan pengambilan data dapat dilihat pada Gambar 6. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Metrologi Panjang, Puslit Metrologi LIPI pada suhu $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$ dan kelembapan ruangan $(50,0 \pm 3,4)\%$.

Tahap ketiga adalah analisis hasil pengukuran. Pada tahap ini, data penunjukan *length gauge* yang sudah terkoreksi dikombinasikan dengan nilai panjang terkoreksi dari meja inklinasi sehingga diperoleh gradien nilai standar. Satuan kemiringan gradien ($\mu\text{m/m}$) mempunyai kesetaraan dengan derajat busur atau lebih dikenal sebagai satuan sudut (arcsec) sehingga penyimpangan sudut level elektronik dikalkulasi dari gradien nilai standar dikurangi dengan nilai yang ditunjukkan oleh level elektronik.

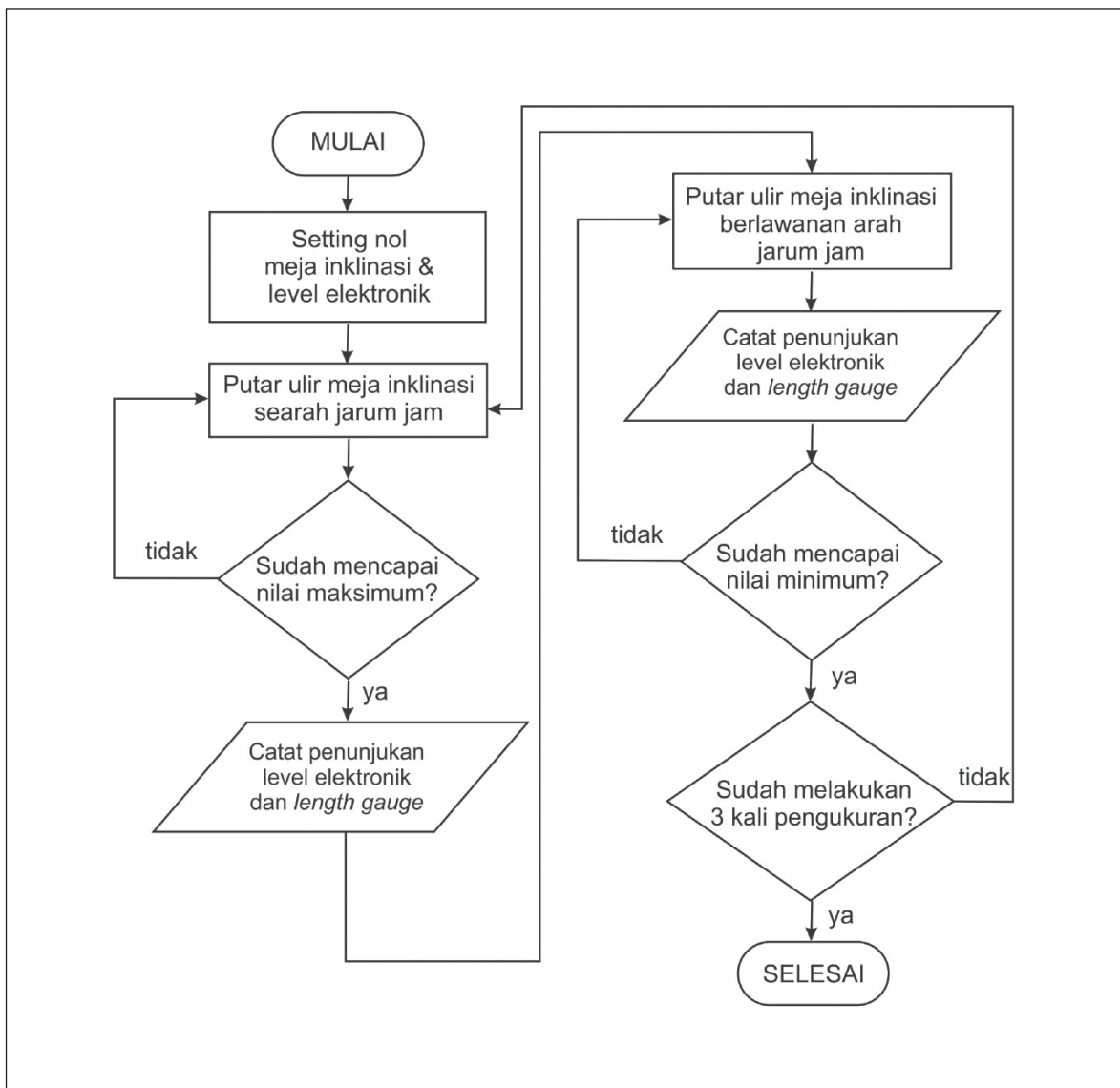
Tahap keempat adalah validasi metode dengan E_n dan *Birge Ratio Test*. Untuk mendapatkan nilai E_n diperlukan nilai dari level elektronik pada titik ke- i , nilai acuan pada titik ke- i , ketidakpastian pengukuran level elektronik pada titik ke- i , dan ketidakpastian pengukuran nilai acuan pada titik ke- i . Keempat nilai



Gambar 4. Skema Pengukuran untuk Menentukan Penyimpangan Sudut Level Elektronik dengan Menggunakan Metode Inklinasi



Gambar 5. *Setup* Pengukuran Level Elektronik dengan Menggunakan Metode Inklinasi



Gambar 6. Diagram Alur Pengaturan dan Pengambilan Data Pengukuran

tersebut kemudian dikalkulasi dengan menggunakan persamaan (2), sedangkan untuk menginvestigasi konsistensi nilai pengukuran semua peserta digunakan *Birge ratio*, R_B . Komponen yang diperlukan hanya jumlah peserta yang ikut dalam uji banding. Nilai *Birge ratio* tersebut kemudian dikalkulasi dengan menggunakan persamaan (3).

D. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

1. Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran

Acuan utama dalam mengevaluasi ketidakpastian pengukuran adalah metode ISO GUM yang dituangkan dalam *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.^[14] Berdasarkan model matematis pada persamaan (1), penyimpangan sudut inklinasi level elektronik (E) dapat dinyatakan sebagai fungsi dari p_i dengan p_i merupakan input kuantitas dari, y_p , l_p , dan R_i .

$$E = f(p_i) \dots \dots \dots (4)$$

Oleh karena itu, persamaan ketidakpastian pengukurannya dapat diekspresikan dengan Persamaan 5, sebagai berikut:

$$u_c^2(E) = \sum_{i=1}^N [C_i \times u(p_i)]^2 \dots \dots \dots (5)$$

dengan koefisien sensitivitas C_i

$$C_i = \frac{\partial E}{\partial p_i} \dots \dots \dots (6)$$

di mana $C_1 = C_{y_i}$; $C_2 = C_{l_i}$; dan $C_3 = C_{R_i}$

maka,

$$u_c^2(E) = \sum_{i=1}^N [C_y \times u(y_i)]^2 + \sum_{i=1}^N [C_l \times u(l_i)]^2 + [C_R \times u(R_i)]^2 \dots \dots \dots (7)$$

dengan:

$u_c(E)$ = ketidakpastian gabungan

$u(y_1)$ = ketidakpastian dari keberulangan pembacaan *length gauge*

$u(y_2)$ = ketidakpastian dari daya baca *length gauge*

$u(y_3)$ = ketidakpastian pengukuran dari kalibrasi *length gauge*

$u(y_4)$ = ketidakpastian dari kesalahan geometri

$u(l_1)$ = ketidakpastian pengukuran dari kalibrasi meja inklinasi

$u(l_2)$ = ketidakpastian dari panjang lengan efektif meja inklinasi

$u(R_1)$ = ketidakpastian dari dampak histerisis

$u(R_2)$ = ketidakpastian dari daya baca level elektronik

Tabel 1. Komponen Ketidakpastian Pengukuran Level Elektronik

SUMBER KETIDAKPASTIAN	SATUAN	JENIS DISTRIBUSI	SIMBOL	KETIDAKPASTIAN STANDAR	KOEF. SENSITIVITAS
Keberulangan pembacaan <i>length gauge</i>	μm	Tipe A	$u(y_1)$	0,06	$-\frac{1}{l}$
Daya baca <i>length gauge</i>	μm	Rectangular	$u(y_2)$	0,01	$-\frac{1}{l}$
Ketidakpastian pengukuran dari kalibrasi <i>length gauge</i>	μm	Normal	$u(y_3)$	0,13	$-\frac{1}{l}$
Kesalahan geometri	μm	Rectangular	$u(y_4)$	0,29	$-\frac{1}{l}$
Ketidakpastian pengukuran dari kalibrasi meja inklinasi	μm	Normal	$u(l_1)$	2,50	$-\frac{y}{l^2}$
Panjang lengan efektif meja inklinasi	μm	Rectangular	$u(l_2)$	1,16	$-\frac{y}{l^2}$
Dampak histerisis	μm/m	Rectangular	$u(R_1)$	0,80	1
Daya baca level elektronik	μm/m	Rectangular	$u(R_2)$	0,29	1
Ketidakpastian gabungan (u_c)				0,85 μm/m	
Ketidakpastian terentang 95% dengan k = 2				2 μm/m	

Berdasarkan persamaan (7), secara lengkap perhitungan ketidakpastian pengukuran level elektronik dengan menggunakan metode inklinasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1, dapat diamati bahwa nilai ketidakpastian standar terbesar berasal dari ketidakpastian pengukuran kalibrasi meja inklinasi dan ketidakpastian panjang lengan efektif meja inklinasi. Akan tetapi, nilai ini belum dikalkulasi dengan nilai koefisien sensitivitas dari setiap masing komponen tersebut. Sehubungan dengan nilai koefisien sensitivitas untuk kedua komponen tersebut sangat kecil, yaitu $\left(\frac{y}{l^2}\right)$, maka kontribusi kedua komponen tersebut terhadap ketidakpastian gabungan menjadi sangat kecil, yakni mendekati 0%.

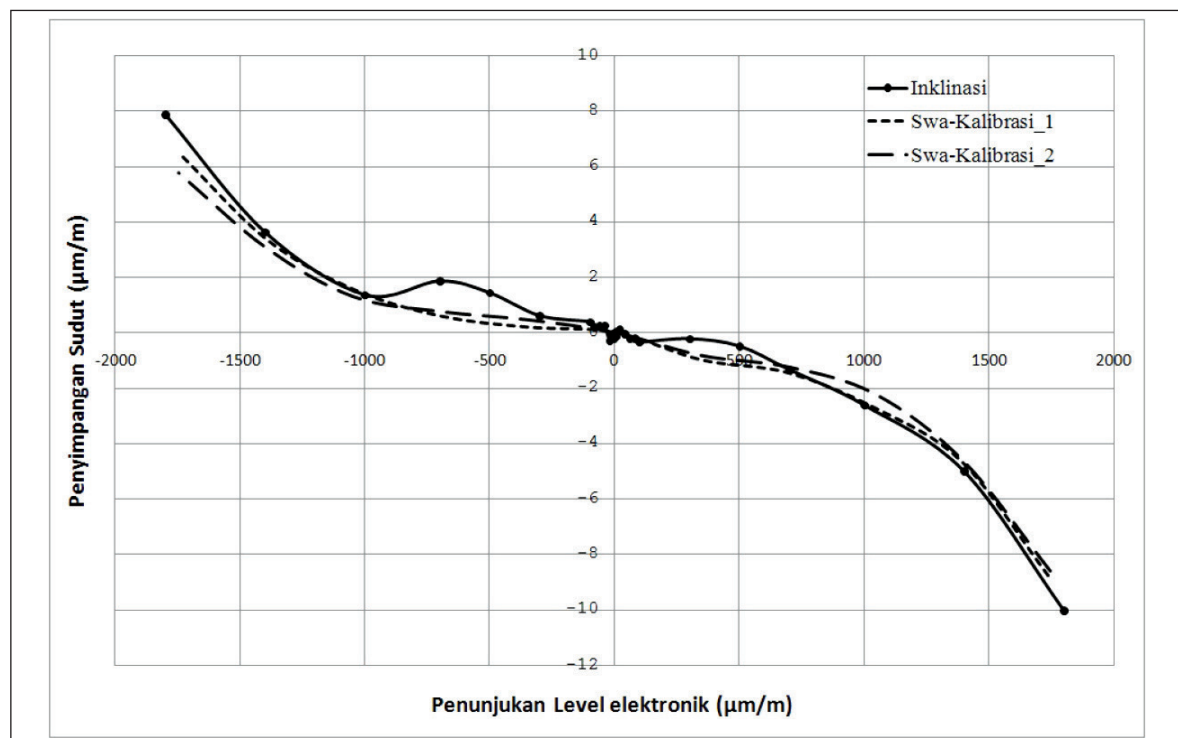
Akan tetapi, hal tersebut berbeda dengan komponen ketidakpastian dari dampak histerisis dan daya baca level elektronik. Kedua komponen tersebut mempunyai nilai koefisien sensitivitas yang bernilai 1 sehingga nilai ketidakpastian standarnya berdampak besar, yakni sebesar 89%, untuk ketidakpastian dari dampak histerisis dan daya baca level elektronik sebesar 11%. Sementara itu, nilai ketidakpastian yang lain, seperti nilai keberulangan pembacaan *length gauge*, daya baca *length gauge*, dan lain-lain,

tidak berdampak besar pada nilai ketidakpastian pengukuran. Hal ini dikarenakan sistem inklinasi pada metode ini yang menggunakan mekanisme ulir untuk gerakan naik dan turun. Dengan menggunakan mekanisme ulir, akan muncul histerisis sehingga penunjukan posisi level elektronik tidak sama antara pergerakan ulir searah jarum jam (naik) dan berlawanan arah jarum jam (turun).

Berdasarkan penelitian ini, dampak histerisis perlu dimasukkan dalam *budget* ketidakpastian pengukuran karena terbukti bahwa nilai dari dampak histerisis berkontribusi sebesar 89% dalam ketidakpastian pengukuran. Hal ini juga melengkapi penelitian sebelumnya bahwa dampak histerisis belum ditambahkan pada *budget* ketidakpastian.^[11]

2. Distribusi Pengukuran Level Elektronik dengan Menggunakan Metode Inklinasi

Hasil pengukuran level elektronik pada penelitian ini divalidasi dengan metode swakalibrasi, yakni dalam bentuk uji banding dengan menggunakan SelfA47 sebagai referensi pengukuran.^[6,15] Distribusi pengukuran level elektronik dengan kedua metode tersebut ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 7. Perbandingan Hasil Pengukuran Level Elektronik

Tabel 2. Hasil Analisis Data Perbandingan Hasil Pengukuran Level Elektronik

	PENUNJUKAN LEVEL ELEKTRONIK ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
	1400	700	-700	-1400
$\bar{x}_w (\mu\text{m}/\text{m})$	-4,7	-1,4	0,4	2,7
$u(\bar{x}_w) (\mu\text{m}/\text{m})$	0,9	0,9	0,9	0,9
R_B	0,16	0,05	0,36	1,51
$ E_n $ Metode Swa-Kalibrasi	0,03	0,01	0,06	0,25
$ E_n $ Metode Inklinasi	0,06	0,02	0,15	0,62

dengan:

$\bar{x}_w$ = nilai referensi

$u(\bar{x}_w)$ = nilai ketidakpastian rata-rata pembobotan

R_B = Birge ratio

$|E_n|$ = nilai E_n

Berdasarkan gambar tersebut, tampak bahwa secara eksperimental, keseluruhan pola pengukuran level elektronik dengan menggunakan metode inklinasi identik sama dengan metode swakalibrasi yang menggunakan SelfA47 sebagai standar ukur. Hal ini ditunjukkan dengan nilai penyimpangan sudut level elektronik pada rentang $\pm 2.000 \mu\text{m}/\text{m}$ yang saling berdekatan, baik menggunakan metode inklinasi maupun metode swakalibrasi. Meskipun demikian, tampak pada grafik tersebut bahwa semakin besar rentang penunjukan level elektronik, maka akan semakin besar pula nilai penyimpangan sudutnya. Hal ini identik dengan grafik fungsi trigonometri (grafik tangen).

Gambar 7 juga menampakkan adanya bentuk puncak (*peak*) yang cukup tinggi, khususnya pada metode inklinasi rentang antara $-300 \mu\text{m}/\text{m}$ sampai dengan $-1.000 \mu\text{m}/\text{m}$. Bentuk seperti ini tidak dijumpai pada metode swakalibrasi yang menggunakan sistem *rotary table*. Hal ini terjadi karena adanya drif lokal dari mekanisme ulir yang digunakan pada metode inklinasi sehingga penunjukan posisi level elektronik tidak sama antara pergerakan ulir searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam. Meskipun demikian, dengan ketidakpastian pengukuran sebesar $U = 2 \mu\text{m}/\text{m}$, metode tersebut masih berada dalam batas penerimaan. Pembuktian secara statistik dapat didekati dengan menggunakan metode

rata-rata pembobotan (*weighted mean*), sesuai dengan rekomendasi dari CCL MRA. Metode ini berfungsi untuk menghitung nilai referensi dengan analisis data menggunakan persamaan (2) dan (3). Hasil analisis data tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Pada penelitian ini, SelfA47 yang beresolusi 72 arcsec digunakan sebagai standar sehingga tidak semua titik pengukuran dapat dibandingkan menggunakan metode inklinasi. Oleh karena itu, hanya empat titik sampel pengukuran saja yang dapat ditentukan, baik dengan menggunakan metode inklinasi maupun metode swakalibrasi, yakni $1.400 \mu\text{m}/\text{m}$, $700 \mu\text{m}/\text{m}$, $-700 \mu\text{m}/\text{m}$, dan $-1.400 \mu\text{m}/\text{m}$. Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa pada rentang pengukuran level elektronik $\pm 1.400 \mu\text{m}/\text{m}$ secara statistik konsisten karena memenuhi kriteria *Birge ratio*, yakni $R_B < 1,73$ dan nilai $E_n < 1$.

Pada level elektronik yang memiliki rentang pengukuran hingga $\pm 2.000 \mu\text{m}/\text{m}$, hanya 70% saja dari rentang ukur keseluruhan yang disarankan sebagai rentang ukur efektif. Artinya, hanya rentang ukur $\pm 1.400 \mu\text{m}/\text{m}$ saja yang secara statistik konsisten, yakni memenuhi kriteria *Birge ratio*, $R_B < 1,73$ dan nilai $E_n < 1$, sedangkan rentang ukur $+1.400 \mu\text{m}/\text{m}$ s.d. $+2.000 \mu\text{m}/\text{m}$ maupun $-1.400 \mu\text{m}/\text{m}$ s.d. $-2.000 \mu\text{m}/\text{m}$ belum dapat dibuktikan secara empiris.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah menggunakan metode inklinasi dalam pengukuran level elektronik untuk menentukan penyimpangan sudut, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Secara eksperimental, metode ini dapat diaplikasikan untuk menentukan penyimpangan sudut level elektronik yang memiliki rentang pengukuran hingga 2.000 $\mu\text{m/m}$.
- 2) Semakin besar rentang level elektronik yang digunakan, akan semakin besar pula nilai penyimpangan sudutnya.
- 3) Kontribusi terbesar dari nilai ketidakpastian pengukuran dengan metode ini berasal dari dampak histerisis, yakni sebesar 89%. Sementara itu, nilai ketidakpastian yang lain, seperti daya baca level elektronik, keberulangan pembacaan *length gauge*, dan lainnya, tidak berdampak begitu besar.
- 4) Metode ini sangat cocok digunakan untuk kalibrasi elektronik level bagi laboratorium kalibrasi dan industri karena membutuhkan peralatan yang sederhana, murah, mudah didapat, dan memiliki akurasi yang bagus. Terbukti dengan nilai $E_n < 1$ sehingga dapat disebutkan bahwa metode ini telah memenuhi syarat dan berkesesuaian dengan metode yang sudah tervalidasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para peneliti dan teknisi di Laboratorium Metrologi Panjang atas semua bantuannya selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Li, X. H., B. Chen, dan Z. R. Qiu. 2013. "The Calibration and Error Compensation Techniques for an Articulated Arm CMM with Two Parallel Rotational Axes." *Measurement* 46(1): 603–609. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.08.020>.
- [2] Teleshevskii, V. I. dan A. V. Glubokov. 2004. "A Computerized Data Acquisition System for Measuring Planarity Deviations with Electronic Levels." *Measurement Techniques* 47(11): 1055–1060. Terakhir dimodifikasi pada November 2004. <http://doi.org/10.1007/s11018-005-0058-4>.
- [3] Zahwi, S. Z., M. A. Amer, M. A. Abdou, dan A. M. Elmelegy. 2013. "On the Calibration of Surface Plates." *Measurement* 46(2): 1019–1028. Terakhir dimodifikasi pada Februari 2013. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.10.009>.
- [4] A. Gusel, B. A. and A. S. 2000. "Assuring the Traceability of Electronic Levels for Calibration of Granite Surface Plate." *XVI IMEKO World Congress*: 2–5.
- [5] Acko, B. 2005. "Calibration of Electronic Levels Using A Special Sine Bar." *Precision Engineering* 29 (April 2004): 48–55. Terakhir dimodifikasi pada Januari 2005. <http://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.04.004>.
- [6] Watanabe, T., A. Praba, W. Samit, K. Vacharanukul, dan A. Tonmueanwai. 2011. "Research on the Advancement of Angle Standard Technology and the Establishment of International Comparison in ASEAN Countries." NEDO Joint Research Project.
- [7] Watanabe, T., W. Samit, K. Vacharanukul, A. Tonmueanwai, dan A. P. Drijarkara. 2013. "High Resolution Self a Rotary Table by the Interpolation Signal Calibration." *International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology*: 53–58. Taipei.
- [8] Watanabe, T., A. P. Drijarkara, dan W. Samit. 2011. "Self-Calibratable Rotary Table for Angular Standards." *International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments* 10: 1–6.
- [9] Piratelli-filho, A. dan B. Giacomo. Di. 2003. "Uncertainty Evaluation in Small Angle Calibration Using ISO GUM Approach and Monte Carlo Method." *XVII IMEKO World Congress*: 3–6.
- [10] Novyanto, O. dan N. Alfiyati. 2016. "An Approach Method to Calibrate the Autocollimator with Small Angle Measurement Range." *MAPAN-Journal of Metrology Society of India* 31: 9–15. Terakhir dimodifikasi pada Maret 2016. <http://doi.org/10.1007/s12647-015-0153-1>.
- [11] Novyanto, O. 2012. "Evaluasi Ketidakpastian Inklinometer Elektronik dengan Perhitungan Koefisien Sensitivitas Menggunakan Pendekatan Numerik." *Instrumentasi* 36(1): 37–44.
- [12] Kacker, R., R. Datla, dan A. Parr. 2002. "Combined Result and Associated Uncertainty from Interlaboratory Evaluations Based on the ISO Guide." *Metrologia* 39: 279–293.

- [13] Zaid, G., Dwi L, dan Suherlan. 2011. “Analisa Hasil Uji Banding Antar Laboratorium Nasional Tingkat Asia Pasifik untuk Termometer Cairan dalam Gelas.” *Standardisasi* 13(3): 184–191.
- [14] JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). 2008. “JCGM 100:2008. Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.”
- [15] Kokuyama, W., T. Watanabe, H. Nozato, dan A. Ota. 2016. “Angular Velocity Calibration System with A Self-Calibratable Rotary Encoder.” *Measurement* 82: 246–253. Terakhir dimodifikasi pada Maret 2016. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.011>.