

REDUKSI KESALAHAN KOSINUS PADA KALIBRASI *UNIVERSAL MEASURING MACHINE* DENGAN MENGGUNAKAN *DISPLACEMENT LASER INTERFEROMETER*

COSINE ERROR REDUCTION ON THE UNIVERSAL MEASURING MACHINE CALIBRATION USING DISPLACEMENT LASER INTERFEROMETER

Ardi Rahman

Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi dan Metrologi – LIPI
Kompleks Puspiptek Gedung 420 Serpong Tangerang Banten
Pos-el: justardi@gmail.com

ABSTRACT

The calibration is important for many people as it can guarantee the traceability of measurement. Universal measuring machine is one of the coordinate measuring machine which is capable to calibrate the amount of dimensional measurement standards, while, the UMM was calibrated by displacement laser interferometer. In the UMM calibration, cosine error was occurred, where the measurement result value is greater than the actual dimension value. The aim of this research was to reduce the cosine error in the UMM calibration using the DLI by adjusting the DLI optics. The results showed that the cosine error was decreased 10 μm compared to the 2006 calibration data, and the uncertainty of measurement decrease of 61.5%.

Keywords: Calibration, Displacement laser interferometer, Universal measuring machine, Cosine error

ABSTRAK

Kalibrasi merupakan hal yang penting bagi banyak pihak karena dapat menjamin ketertelusuran pengukuran. Universal measuring machine adalah salah satu mesin ukur koordinat yang mampu mengukur secara dimensional standar pengukuran besaran panjang sementara itu, UMM dikalibrasi dengan menggunakan displacement laser interferometer. Pada kalibrasi UMM dengan DLI dapat terjadi kesalahan kosinus. Ciri-ciri kesalahan kosinus adalah hasil pengukuran yang menunjukkan nilai yang lebih besar dari dimensi yang sebenarnya. Penelitian ini bertujuan untuk mereduksi kesalahan kosinus pada kalibrasi UMM dengan menggunakan DLI. Reduksi kesalahan kosinus dilakukan dengan penyempurnaan alignment optik pada DLI. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan data kalibrasi tahun 2006 yang menunjukkan terjadinya penurunan kesalahan kosinus sebesar 10 μm , dan ketidakpastian pengukuran menurun sebesar 61,5%.

Kata Kunci: Kalibrasi, Mesin ukur koordinat, Displacement laser interferometer, Kesalahan kosinus

PENDAHULUAN

Sebagai sebuah *National Metrology Institute* (NMI), Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi, dan Metrologi Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (KIM-LIPI) memiliki tugas menjaga dan mendiseminasikan standar nasional satuan ukur

(SNSU). *Universal measuring machine* (UMM) adalah salah satu jenis mesin ukur koordinat yang dimiliki KIM-LIPI dan digunakan untuk mengkalibrasi standar pengukuran besaran panjang seperti *step gauge*, *line scale*, dan balok ukur. UMM dapat melakukan pengukuran 3 dimensi pada sumbu X, Y, dan Z. Proses kalibrasi *step*

gauge ataupun *line scale* di KIM-LIPI dengan menggunakan UMM dengan hanya menggunakan sumbu X. Proses kalibrasi sumbu X UMM menjadi penting untuk menjamin ketertelusuran satuan ukur panjang dari laboratorium kalibrasi dimensional.

Displacement laser interferometer (DLI) merupakan salah satu sistem pengukuran yang dapat digunakan untuk mengkalibrasi UMM.¹ Pada sistem DLI terdapat dua sumber optik yaitu *linear interferometer* dan *linear retroreflector*. *Linear Interferometer* terdiri dari pemecah sinar yang terpolarisasi yang mampu melewatkan frekuensi tertentu saja dari sinar laser.² *Linear retroreflector* bersifat memantulkan secara sejajar sinar laser yang datang. DLI mengukur pergerakan UMM secara berkelanjutan sepanjang sumbu UMM yang dikalibrasi.²

Proses pengukuran dimensional sebaiknya mengikuti prinsip ABBE yakni garis ukur harus berimpit dengan garis dimensi. Ketidakberimpitan garis ukur dan garis dimensi akan menyebabkan kesalahan kosinus. Kesalahan kosinus menyebabkan data ukur lebih besar dibandingkan dengan dimensi sebenarnya.³ Keberimpitan garis ukur dan garis dimensi akan mengurangi kesalahan kosinus, minimalisasi kesalahan kosinus akan menyebabkan nilai deviasi dari skala nominal atau garis dimensi akan semakin kecil.⁴ Gambar 1 (a) menunjukkan proses terjadinya kesalahan kosinus, antara garis dimensi (garis putus-putus) dan garis ukur (yang mengarah ke *linear interferometer*) terbentuk sudut θ . Besar sudut θ dihitung dengan persamaan trigonometri yaitu:

$$\cos \theta = \frac{x}{y} \dots\dots\dots(1)$$

x adalah nilai nominal UMM dan y adalah nilai pengukuran yang ditunjukkan DLI (Gambar 1 (b)).

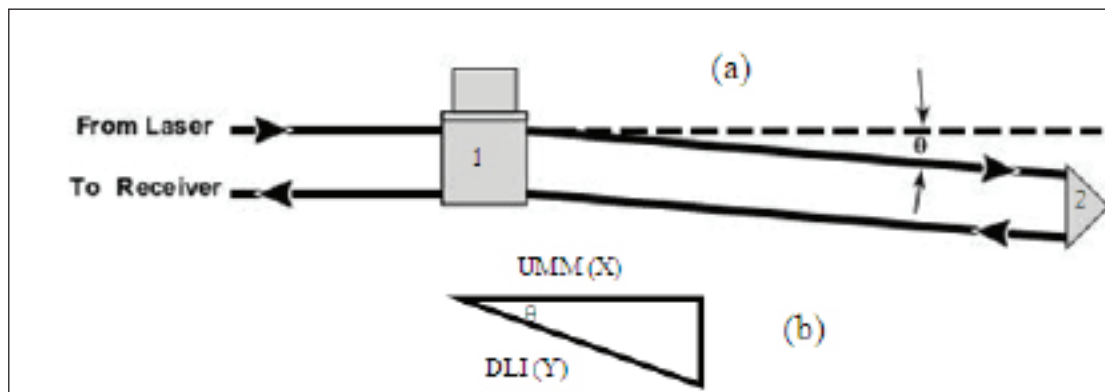
Kesalahan kosinus adalah proporsional dan merupakan fungsi dari nilai pengukuran yang ditunjukkan oleh DLI. Besar kesalahan kosinus ditunjukkan oleh persamaan berikut (dalam satuan meter):⁶

$$\text{Kesalahan kosinus} = (1 - \cos \theta) \dots(2)$$

Pada penelitian ini dibahas tentang pengukuran kesalahan kosinus pada kalibrasi UMM dengan menggunakan DLI. UMM yang dimiliki KIM-LIPI sudah dikalibrasi dengan menggunakan DLI pada tahun 2006, efek kosinus dapat terlihat pada nilai deviasi dari nilai nominal yang besar.⁴ Efek ini dikurangi dengan penyempurnaan *alignment* optik pada sistem DLI. *Alignment* optik dilakukan sedemikian rupa sehingga paralel terhadap sumbu X UMM.⁶ Tujuan penelitian ini adalah menurunkan kesalahan kosinus dan ketidakpastian pengukuran dari data kalibrasi UMM dengan menggunakan DLI tahun 2006 dengan penyempurnaan *alignment*.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Laboratorium Metrologi Dimensi Puslit KIM LIPI pada Agustus 2011. Penelitian ini diawali dengan melakukan perhi-



Keterangan: (a) = Kesalahan kosinus pada pengukuran dengan DLI; (b)= Trigonometri kosinus pada kesalahan kosinus; 1 = *linear interferometer*; 2 = *linear retroreflector*

Gambar 1. Kesalahan kosinus pada DLI⁵

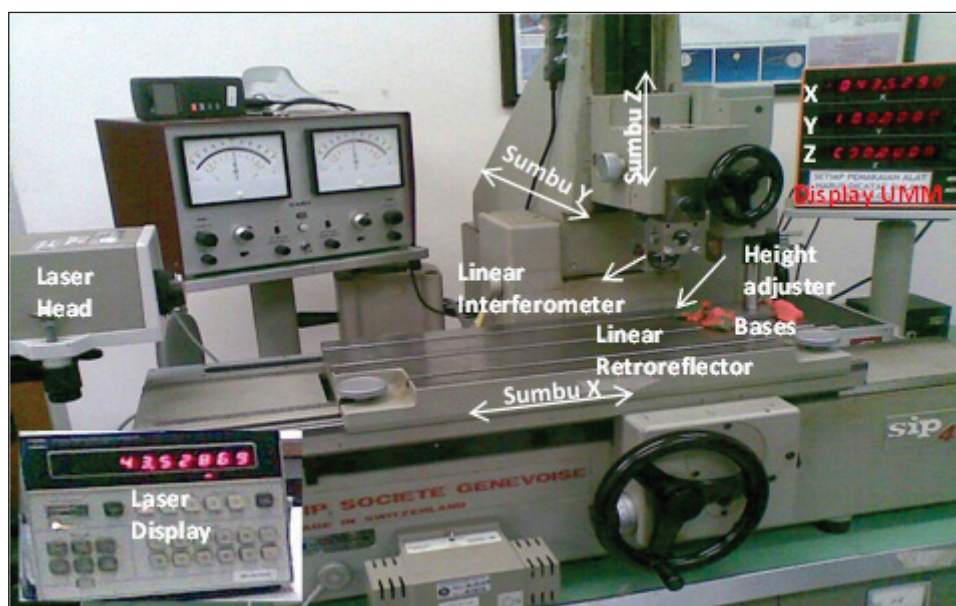
tungan kesalahan kosinus pada hasil kalibrasi sumbu X UMM dengan DLI pada tahun 2006. Data kalibrasi yang dianalisis diambil dari sertifikat kalibrasi sumbu X UMM nomor S. 024311 yang dikeluarkan oleh Puslit KIM LIPI pada 9 Oktober 2006. Data tersebut berisi nilai nominal pengukuran dan nilai deviasi terhadap nilai penunjukan *standard*, selain itu juga terdapat nilai ketidakpastian pengukuran.⁷

Gambar 2 menunjukkan eksperimen penyempurnaan *alignment* pada kalibrasi sumbu X UMM dengan menggunakan DLI. Sistem kalibrasi sumbu X UMM terdiri atas *laser head* HP 5518A, *linear interferometer* HP 10766A, *linear retroreflector* HP 10767A, *bases* HP 10784A, *height adjuster/posts* HP 10785A dan *measurement display* HP 5508A. DLI merupakan laser Helium-Neon yang memiliki dua frekuensi yang berbeda dan memiliki resolusi 0,01 μm . Rentang pengukuran terbagi menjadi dua yaitu jika yang bergerak adalah *linear interferometer*, rentang ukur maksimum adalah 15 m, sebaliknya jika yang bergerak adalah *linear retroreflector*, rentang ukur maksimum adalah 40 m.⁸ Pada penelitian ini, yang diperlakukan diam adalah *linear interferometer* dan yang bergerak adalah *linear retroreflector*.

Linear interferometer diletakkan pada badan UMM yang dapat bergerak ke arah sumbu Z, dalam kasus ini pergerakan sumbu Z hanya untuk

membantu proses *alignment* (setelah *alignment interferometer* tidak digerakkan). Peletakan *linear interferometer* pada sumbu Z dimaksudkan agar pergerakan UMM dan berkas laser dari DLI sejajar, sehingga sudut θ yang terbentuk sangat kecil. *Linear retroreflector* diletakkan pada badan UMM yang dapat bergerak dalam sumbu X. DLI mengukur posisi aktual UMM sepanjang sumbu X. Nominal data ukur UMM merupakan nilai yang dihasilkan oleh *optical grating (encoder)* pada sumbu X.⁹ DLI membaca pergeseran dari titik awal yang merupakan datum bagi DLI maupun UMM. Nilai yang terbaca oleh DLI dihasilkan oleh *encoder* pada *measurement display* DLI.

UMM yang dikalibrasi merupakan model SIP 414M buatan *Societe Genevoise D'Instruments De Physique* (SIP) Swiss yang memiliki rentang ukur sumbu XYZ 400 mm \times 100 mm \times 145 mm.⁹ Kalibrasi dilakukan pada sumbu X yang memiliki rentang ukur 0-400 mm. Kalibrasi dilakukan pada sejumlah titik ukur setiap kelipatan 10 mm.⁷ Setiap titik diukur tiga kali untuk kemudian dirata-ratakan. Hasil kalibrasi kemudian dianalisis lalu dibandingkan dengan data kalibrasi tahun 2006 untuk dipelajari reduksi kesalahan kosinusnya. Data mentah hasil penunjukan DLI kemudian dirata-ratakan lalu dilakukan *offset nol*. Hasil *offset nol* kemudian dikurangi dengan nilai nominal UMM untuk mendapatkan nilai deviasi. Nilai

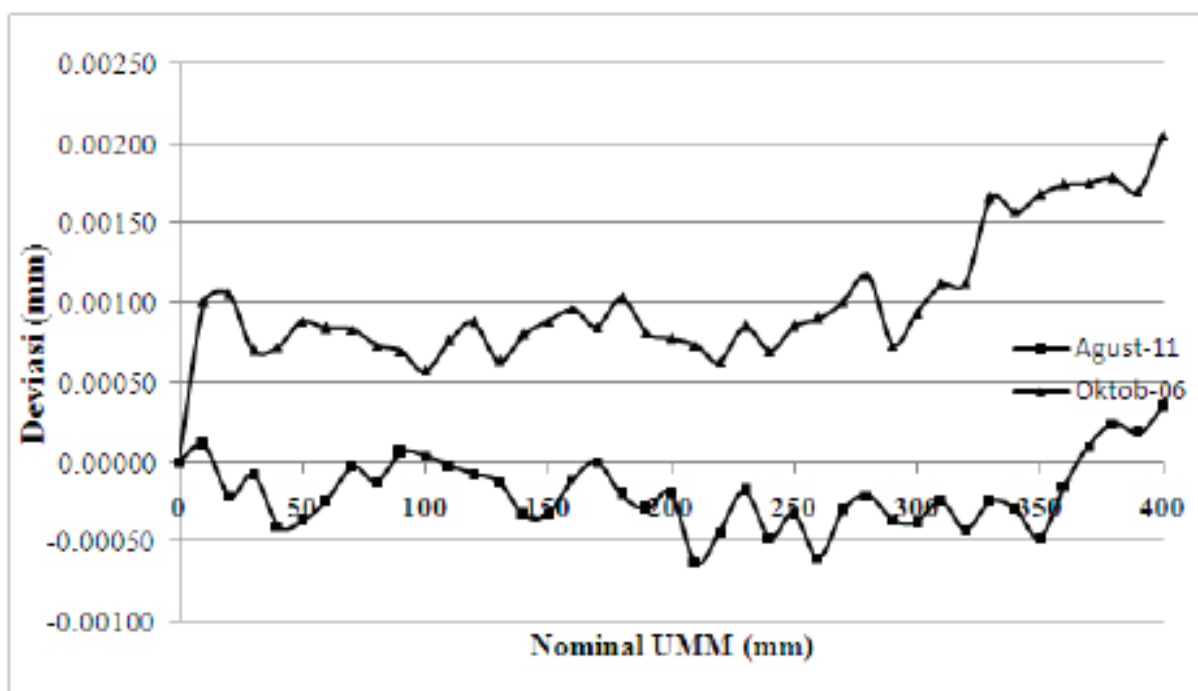


Gambar 2. Sistem kalibrasi UMM dengan menggunakan DLI

deviasi ini dibandingkan dengan data kalibrasi tahun 2006 untuk mengetahui reduksi kesalahan kosinusnya.

Ketidakpastian pengukuran tidak dapat dilepaskan dari sistem pengukuran. Nilai ketidakpastian menunjukkan kualitas pengukuran seperti alat ukur, lingkungan di mana pengukuran dilakukan, dan orang yang mengukur⁴ sehingga pengukuran dapat dibandingkan dengan hasil-hasil pengukuran lain, acuan, spesifikasi, atau standar.¹⁰ Tanpa adanya suatu estimasi ketida-

pastian pengukuran, maka nilai pengukuran dapat diragukan keabsahannya.⁴ Dalam penelitian ini dilakukan perhitungan nilai ketidakpastian pengukuran, kemudian dibandingkan dengan nilai ketidakpastian pengukuran dari sertifikat kalibrasi tahun 2006. Penjelasan lebih rinci mengenai estimasi ketidakpastian pengukuran dalam penelitian ini dapat dilihat di dalam lampiran.



Gambar 3. Grafik hasil kalibrasi UMM

Tabel 1. Kesalahan kosinus pada setiap titik pengukuran

| No. | Rentang Nominal UMM | Cos θ (2006) | Cos θ (2011) | Kesalahan Kosinus (2006) (m) | Kesalahan Kosinus (2011) (m) |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 0 - 50 | 0,61695 | 0,61692 | 0,38305 | 0,38308 |
| 2 | 60 - 100 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 3 | 110 - 150 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 4 | 160 - 200 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 5 | 210 - 250 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 6 | 260 - 300 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 7 | 310 - 350 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| 8 | 360 - 400 | 0,54031 | 0,54030 | 0,45969 | 0,45970 |
| Rata - rata kesalahan kosinus (m) | | | | 0,45011 | 0,45012 |
| Perbedaan (2011-2006) (m) | | | | 0,00001 | |

Tabel 2. Anggaran ketidakpastian sistem kalibrasi UMM dengan DLI

| Uncert source | Unit | Dist. | Exp. uncertainty/ U | Cov. Factor/ Pembagi | Deg. of freedom/ vi | Std. Uncert/ ui | Sens. Coeff/ ci | $c_i \cdot u_i$ | $(c_i \cdot u_i)^2$ | $(c_i \cdot u_i)^2 / v_i$ |
|----------------------------|---------------|--------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|---|-----------------|---------------------|---------------------------|
| Keberulangan pengukuran | μm | Normal | 0,2028 | 3,3166248 | 10 | 0,06113 | 1 | 0,06113 | 0,0037372 | 0,000001 |
| Daya baca DLI | μm | Rect | 0,0050 | 1,7320508 | 1E+99 | 0,00289 | 1 | 0,00289 | 0,0000083 | 0,000000 |
| Daya baca UMM | μm | Rect | 0,2500 | 1,7320508 | 1E+99 | 0,14434 | 1 | 0,14434 | 0,0208333 | 0,000000 |
| Koreksi DLI (sertifikat) | μm | Normal | 0,0200* | 2 | 60 | 0,01 | 1 | 0,01000 | 0,0001000 | 0,000000 |
| Kesalahan geometrik | μm | Rect | 0,3125 | 1,7320508 | 60 | 0,18042 | 1 | 0,18042 | 0,0325521 | 0,000018 |
| Suhu benda | μm | Rect | 0,0920 | 1,7320508 | 1E+99 | 0,05312 | 1 | 0,05312 | 0,0028213 | 0,000000 |
| Koefisien TE 11.5 E-6 | μm | Rect | 0,0005 | 1,7320508 | 1E+99 | 0,00027 | 1 | 0,00027 | 0,0000001 | 0,000000 |
| Kesalahan elektronik | μm | Rect | 0,0100 | 1,7320508 | 60 | 0,00577 | 1 | 0,00577 | 0,0000333 | 0,000000 |
| Panjang gelombang DLI | μm | Rect | 0,0008 | 1,7320508 | 60 | 0,00046 | 1 | 0,00046 | 0,0000002 | 0,000000 |
| <i>Optic Thermal drift</i> | μm | Rect | 0,0200 | 1,7320508 | 60 | 0,01155 | 1 | 0,01155 | 0,0001333 | 0,000000 |
| | | | | | | | Jumlah | | 0,0602 | 0,0000 |
| | | | | | | | Ketidakpastian gabungan, uc | | 0,2454 | |
| | | | | | | | <i>Eff. Deg of freedom, v_{eff}</i> | | | 190 |
| | | | | | | | Faktor koreksi dengan tingkat kepercayaan 95% | | | 2,00 |
| | | | | | | | Ketidakpastian terentang, U95 (μm) | | | 0,5 |

Keterangan : *diperoleh dari sertifikat kalibrasi DLI yang dikeluarkan oleh NML-CSIRO (sekarang NMI Australia) ¹¹

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data deviasi hasil kalibrasi tahun 2006⁷ dan deviasi pada penelitian ini dibuat dalam bentuk grafik pada Gambar 3. Pada tahun 2006 terlihat bahwa terjadi kecenderungan kenaikan nilai deviasi seiring kenaikan nilai nominal UMM. Kondisi kecenderungan kenaikan ini mengindikasikan kesalahan kosinus.⁴ Kecenderungan kenaikan ini sangat kontras dibandingkan dengan grafik deviasi pada penelitian ini sehingga terjadi perubahan bolak-balik nilai deviasi di sekitar nilai nominal.

Kesalahan kosinus diperoleh dengan menghitung sudut θ dengan menggunakan persamaan (1), kemudian sudut θ digunakan untuk menghi-

tung kesalahan kosinus dengan persamaan (2). Tabel 1 menampilkan besar kesalahan kosinus pada setiap titik pengukuran.

Dari Tabel 1 terlihat bahwa pada data kalibrasi tahun 2006 terjadi kecenderungan kenaikan kesalahan kosinus seiring kenaikan nilai nominal, sedangkan untuk tahun 2011 (penelitian ini) kesalahan kosinus besarnya relatif tetap. Perbedaan kesalahan kosinus tahun 2006 dan tahun 2011 sebesar 0,00001 m atau 10 μm . Kesalahan sebesar ini signifikan dibandingkan dengan resolusi UMM yang sebesar 0,5 μm .

Ketidakpastian pengukuran pada kalibrasi tahun 2006 sebesar 1,3 μm dengan faktor pengali $k=2$ dan tingkat kepercayaan 95%.⁷ Tabel

2 menunjukkan anggaran ketidakpastian sistem kalibrasi UMM dengan DLI pada penelitian ini. Penjelasan mengenai sumber-sumber ketidakpastian pada Tabel 2 dapat dilihat di dalam lampiran.

Dari Tabel 2 diketahui terdapat sepuluh sumber-sumber ketidakpastian. Estimasi nilai yang diambil pada setiap sumber ketidakpastian dapat dilihat di dalam lampiran. Tabel 2 menunjukkan nilai ketidakpastian pengukuran pada penelitian ini sebesar $0,5 \mu\text{m}$, sedangkan ketidakpastian pengukuran pada tahun 2006 sebesar $1,3 \mu\text{m}$,⁷ sehingga terjadi penurunan ketidakpastian sebesar 61,5%.

KESIMPULAN

Penyempurnaan *alignment* dapat mengurangi kesalahan kosinus sebesar $10 \mu\text{m}$ dan nilai ketidakpastian pengukuran juga menurun sebesar 61,5% dibandingkan dengan data kalibrasi tahun 2006.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ir. Jimmy Pusaka, M.Sc., Bapak Atik, dan rekan-rekan peneliti di Laboratorium Metrologi Dimensi Puslit KIM LIPI atas masukan yang berharga dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Osawa, S. et al. 2003. *Step-gauge calibration using an interferometric coordinate measuring machine and the uncertainty*. Dubrovnik, Croatia: XVII IMEKO World Congress, Metrology in the 3rd Millennium.
- ²Castro, H.F.F. and M. Burdekin. 2004. Evaluation of the measurement uncertainty of a positional error calibrator based on laser interferometer.

International Journal of Machine Tools and Manufacturer 45 (2005): 285–291.

- ³Iwan, S. dan Andry M. N. 2008. Analisis kinerja mesin bubut LeBlond 17". (<http://isjd.pdii.lipi.go.id/admin/jurnal/2208129135.pdf>, diakses 4 Maret 2012).
- ⁴Okasatria, N. Dan Eka P. 2011. Pengaruh kesalahan kosinus terhadap deviasi dari skala nominal (*error*). *Seminar dan Presentasi Ilmiah ke-37*. Jakarta: PPI KIM LIPI.
- ⁵Agilent Technologies. 2002. *Laser and Optics User's Manual: Chapter 7A Agilent 10702A and 10766A Linear Interferometers, and Agilent 10703A and 10767A Retroreflectors*. USA: Agilent Technologies.
- ⁶Agilent Technologies. 2002. *Laser and Optics User's Manual: Chapter 15 Accuracy and Repeatability*. USA: Agilent Technologies.
- ⁷Puslit KIM LIPI. 2006. *Sertifikat Kalibrasi Measuring Machine SIP 414 M Nomor S. 024311*. Tangerang: Puslit KIM LIPI.
- ⁸Hewlett-Packard Co. 1986. *HP 5528A Laser Measurement System user's guide*. Santa Clara, USA: HP.
- ⁹Societe Genevoise D'Instruments De Physique. 1979. *SIP 414M Universal Measuring Machine Technical Instructions*. Switzerland: SIP.
- ¹⁰Drijarkara, A.P. dan Z. Ghufro. 2005. *Metrologi: Sebuah pengantar*. Jakarta: Puslit KIM-LIPI.
- ¹¹NML-CSIRO. 2004. *Calibration certificate Ref. RN 47216 issued on 17/5/2004*. Australia: NML-Australia.

LAMPIRAN

Estimasi nilai ketidakpastian dimulai dengan menuliskan suatu model matematis yang menunjukkan hubungan antara besaran-besaran ukur yang berpengaruh. Tiap sumber memiliki nilai ketidakpastian baku, baik dari evaluasi tipe A maupun tipe B. Evaluasi Tipe A yaitu nilai harapan dan variansi diestimasi secara statistik dari sehimpunan pengukuran, sedangkan tipe B nilai harapan dan variansi diestimasi dengan cara mengasumsikan suatu sebaran probabilitas, misalnya sebaran persegi, berdasarkan suatu pengalaman atau informasi lain.¹⁰

Ketidakpastian gabungan dihitung dengan cara menggabungkan semua sumber ketidakpastian, jika sumber-sumber ditambahkan atau dikurangkan, ketidakpastian digabungkan dengan menjumlahkan kuadrat dari ketidakpastian baku tiap sumber lalu menarik akar kuadratnya. Apabila sumber-sumber dikalikan atau dibagi, tiap-tiap sumber dikalikan dengan suatu koefisien sensitivitas. Hitung ketidakpastian terentang dengan mengalikan ketidakpastian gabungan dengan faktor cakupan k .¹⁰

Dalam penelitian ini, sumber ketidakpastian sistem kalibrasi UMM dengan DLI adalah keberulangan pengukuran yang diperoleh dari variansi pengukuran di suatu nominal tertentu, daya baca DLI dan UMM yang dapat diperoleh dari nilai terkecil yang dapat dibaca, nilai koreksi DLI yang dapat diperoleh dari sertifikat kalibrasi DLI. Sumber lainnya yaitu kesalahan geometris yang dapat diperoleh dari persamaan berikut⁸:

$$\text{Kesalahan geometris} = \frac{S^2}{8L^2} \dots\dots\dots(3)$$

S merupakan estimasi nilai pelencengan sinar pantulan berkas laser dari *linear retroreflector* ke *receiver* DLI, sedangkan L adalah panjang UMM. Ketidakpastian akibat kesalahan elektronik diestimasi dari nilai resolusi DLI,² suhu benda,² panjang gelombang laser sebesar 0,02 ppm dari panjang UMM,² dan ketidakpastian dari koefisien pertambahan panjang benda yang dapat diestimasi sebesar 10% dari nilai koefisien.² Estimasi ketidakpastian suhu benda dapat diperoleh dari perkalian panjang UMM dengan koefisien perpanjangan termal benda dengan perbedaan suhu dari suhu standar 20°C,² dan *optic thermal drift*.²

Tabel 2 menunjukkan terdapat sepuluh sumber ketidakpastian. Sumber keberulangan pengukuran diperoleh dari standar deviasi dari sepuluh kali pengukuran di titik yang sama dengan faktor pembagi akar dari jumlah pengulangan. Sumber daya baca UMM dan DLI diperoleh dari setengah daya baca terkecil alat dengan menggunakan distribusi persegi dengan pembagi. Sumber koreksi DLI diperoleh dari sertifikat kalibrasi DLI dengan sebaran normal dan faktor pembagi dua.

Sumber kesalahan geometris diperoleh dari persamaan (3) dengan memasukkan nilai S sebesar 1 mm dan L sebesar 400 mm, sebaran yang digunakan persegi dengan faktor pembagi. Sumber suhu benda diperoleh dari perkalian panjang sumbu X UMM dengan koefisien termal UMM (*Steel* sebesar 11,5 ppm/°C) dan perbedaan suhu pengukuran dengan suhu 20°C sebesar 0,2°C. Sumber koefisien pemanjangan termal dapat diestimasi dari 10% nilai koefisien. Sumber kesalahan elektronik diperoleh dari resolusi DLI, sedangkan *optic thermal drift* adalah sebesar 0,02 ppm.

