

EVALUASI UNJUK KERJA KALIBRATOR TORSI STATIK HASIL RANCANG BANGUN MELALUI UJI BANDING KALIBRASI

Performance Evaluation of Static Torque Calibrator Design Result Through Calibration Proficiency Testing

Hilman Syaeful Alam

UPT Balai Pengembangan Instrumentasi – LIPI
Jl. Sangkuriang Komp. LIPI Gd. 30, Bandung 40135, Jawa Barat, Indonesia.
E-mail: hilm003@lipi.go.id

Diterima: 9 September 2013, Direvisi: 10 Desember 2013, Disetujui: 12 Desember 2013

Abstrak

Unjuk kerja kalibrator torsi statik hasil rancang bangun telah dievaluasi melalui uji banding kalibrasi menggunakan artefak yang sama dengan hasil kalibrasi laboratorium referensi. Tujuan penelitian ini adalah untuk memastikan keberterimaan kalibrator terhadap kriteria atau persyaratan dalam uji banding sehingga dapat meningkatkan kepercayaan hasil pengukuran dan digunakan sebagai alat standar untuk mengkalibrasi peralatan ukur torsi statik di industri. Metode kalibrasi yang digunakan mengacu ke Euramet cg-14, sedangkan kriteria keberterimaan hasil uji banding didasarkan pada evaluasi nilai. Berdasarkan hasil evaluasi, kalibrator torsi statik hasil rancang bangun memiliki ketidakpastian pengukuran maksimum $\pm 0,016$ Nm atau $\pm 0,01$ % terhadap skala penuhnya. Kemudian berdasarkan hasil uji banding, nilai untuk seluruh titik ukur berhasil memenuhi kriteria yang di persyaratkan, dimana semua nilai lebih kecil dari 1, artinya perbedaan akurasi hasil pengukuran dengan sistem referensi masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga hasil pengukuran kalibrator tersebut dapat dipercaya dan layak digunakan sebagai alat standar untuk mengkalibrasi peralatan ukur torsi statik di industri.

Kata kunci: kalibrator, torsi statik, uji banding, kalibrasi, Euramet cg-14.

Abstract

Performance of static torque calibrator has been evaluated through proficiency testing using calibration of the same artifacts with used by the calibration results of a reference laboratory. The purpose of this study was to ascertain the acceptability of calibrator against the criteria or requirements in the proficiency testing, so it can increase the confidence of the measurement results and can be used as a standard for calibrating the static torque measuring device in the industry. Calibration methods refer to Euramet cg-14, while the proficiency testing acceptance criteria based on the evaluation of E_n value. Based on the evaluation, the static torque calibrator has a maximum uncertainty of ± 0.016 Nm or $\pm 0.01\%$ of full scale. Then based on the results of proficiency testing, E_n value for the entire measuring point has been successfully meet with the acceptance criteria, meaning that the difference in accuracy of measurement results with the reference system is still within acceptable limits so that calibrator measurement results are reliable and feasible to use as a standard for calibrating the static torque measuring device in the industry.

Key words: calibrator, static torque, proficiency testing, calibration, Euramet cg-14.

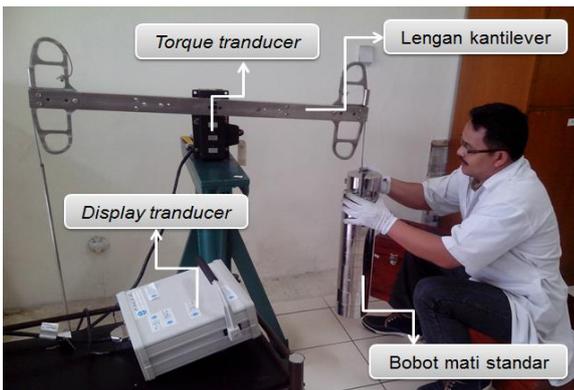
1. PENDAHULUAN

Uji banding antar laboratorium adalah salah satu persyaratan dalam akreditasi ISO/IEC 17025:2005 dan merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mengevaluasi unjuk kerja hasil kalibrasi. Menurut Ferrero (2009), uji banding dapat meningkatkan kepercayaan hasil pengukuran yang diperoleh dari laboratorium yang berbeda. Sedangkan menurut Miller (2009), uji banding merupakan pemeriksaan eksternal

unjuk kerja suatu laboratorium berupa perbandingan akurasi dengan sistem referensi. Beberapa penelitian terkini yang menggunakan metode uji banding dalam mengevaluasi unjuk kerja suatu standar alat ukur dan pengujian, diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Standiford & Lee (2013), Heuillet dkk. (2013), Chen, dkk. (2013) dan Powell dkk. (2013).

Dalam penelitian ini, unjuk kerja kalibrator torsi statik hasil rancang bangun akan dievaluasi

melalui uji banding kalibrasi. Gambar 1 menunjukkan kalibrator torsi statik hasil rancang bangun. Kalibrator tersebut dirancang untuk merealisasikan pengukuran torsi pada arah jarum jam (CW) dan sebaliknya (CCW) dengan rentang ukur mulai 25 Nm hingga 250 Nm menggunakan suatu lengan kantilever yang memiliki panjang 0.5 m, dimana pada salah satu ujungnya digantungkan massa bobot mati standar. Massa bobot mati standar memiliki nilai nominal 5 kg dengan kelas akurasi OIML F1 sebanyak 10 buah untuk merealisasikan pengukuran torsi statik dengan jarak kenaikan setiap 25 Nm. Gaya atau beban yang dihasilkan dari perkalian antara massa bobot mati dan gravitasi lokal, kemudian dikalikan terhadap jarak tegak lurusnya pada titik sumbu puntir sehingga pada titik tersebut akan timbul torsi. Torsi ditransmisikan secara langsung pada alat ukur torsi yang akan dikalibrasi (*torque transducer* atau *analyzer*) tanpa melibatkan kontak dengan komponen yang lain misalnya bantalan dan tumpuan.



Gambar 1 Kalibrator torsi statik hasil rancang bangun.

Tujuan evaluasi unjuk kerja kalibrator torsi statik hasil rancang bangun ini adalah untuk memastikan keberterimaan kalibrator terhadap kriteria atau persyaratan dalam uji banding, sehingga dapat meningkatkan kepercayaan hasil pengukuran dan digunakan sebagai alat standar untuk mengkalibrasi peralatan ukur torsi statik di industri.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Torsi yang dibangkitkan oleh kalibrator torsi statik adalah perkalian antara gaya atau berat terhadap panjang lengan. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi hasil pengukuran kalibrator torsi statik yang dapat diketahui dan diperhitungkan sebagai sumber-sumber kesalahan, diantaranya adalah kontribusi

kesalahan dari gaya yang ditimbulkan, berupa kesalahan nilai massa bobot mati dan gravitasi lokal, kemudian kontribusi kesalahan dari efek gaya apung (efek *buoyancy*) berupa pengaruh massa jenis udara dan massa jenis bobot mati standar. Selanjutnya, kontribusi kesalahan dari panjang lengan torsi terhadap titik acuan puntiran berupa efek perubahan temperatur pada lengan torsi dan deformasi arah lateral (tegak lurus sumbu). Dengan memperhitungkan besaran-besaran lain yang berpengaruh, maka menurut Wenda (2005), torsi yang dihasilkan dapat dihitung:

$$M_k = (F - F_b)g_L L(1 + \alpha\theta) \quad (1)$$

dimana:

$$F = m \cdot g \quad (2)$$

$$F_b = -(V_m \cdot \rho_u \cdot g_L) = -\left(\frac{m}{\rho_m}\right)\rho_u g_L \quad (3)$$

sehingga:

$$M_k = m \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) g_L L(1 + \alpha\theta) \quad (4)$$

dimana:

- M_k : momen puntir (torsi), Nm
- L : panjang lengan torsi, m
- F : gaya yang bekerja pada ujung luar lengan torsi, N
- g_L : gravitasi lokal, m/s^2
- F_b : gaya apung (gaya Buoyancy), N
- α : koefisien muai thermal bahan lengan torsi, $1/^\circ C$
- θ : perbedaan temperatur lengan terhadap $20^\circ C$
- m : massa konvensional bobot mati, kg
- ρ_u : massa jenis udara, kg/m^3
- ρ_m : massa jenis bobot mati, kg/m^3

Model matematika pengukuran torsi termasuk dalam pengukuran tak langsung atau sebagai fungsi dari beberapa besaran yang lain, yaitu:

$$M_k = f(m, \rho_u, \rho_m, g_L, L, \alpha, \theta) \quad (5)$$

Maka menurut Taylor (Rohim, 2006), kesalahan sistematis pengukuran dapat dihitung sebagai turunan parsial masing-masing besaran dikalikan kesalahannya, sehingga koefisien sensitivitas dari masing-masing komponen adalah:

$$c_1 = \frac{\partial M_k}{\partial m} = \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) g_L L(1 + \alpha\theta) \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{\partial M_k}{\partial \rho_u} = -\frac{m}{\rho_m} g_L L(1 + \alpha\theta) \quad (7)$$

$$c_3 = \frac{\partial M_k}{\partial \rho_m} = m \frac{\rho_u}{\rho_m^2} g_L L (1 + \alpha \theta) \quad (8)$$

$$c_4 = \frac{\partial M_k}{\partial g_L} = m \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) L (1 + \alpha \theta) \quad (9)$$

$$c_5 = \frac{\partial M_k}{\partial L} = m \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) g_L (1 + \alpha \theta) \quad (10)$$

$$c_6 = \frac{\partial M_k}{\partial \alpha} = m \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) g_L L \theta \quad (11)$$

$$c_7 = \frac{\partial M_k}{\partial \theta} = m \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_m}\right) g_L L \alpha \quad (12)$$

Berdasarkan JCGM 100 (2008), ketidakpastian baku pengukuran torsi, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$u_{M_k} = u_{tcm} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta M_k}{\delta x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (13)$$

Sehingga ketidakpastian pengukuran terentang U_{M_k} untuk setiap titik ukur yang dikalibrasi pada tingkat kepercayaan 95 % dapat dihitung:

$$U_{M_k} = U_{tcm} = k \cdot u_{M_k} \quad (14)$$

dimana:

k : Faktor cakupan = 2.

3. METODE PENELITIAN

Unjuk kerja kalibrator torsi statik hasil rancang bangun dievaluasi melalui uji banding hasil kalibrasi dengan laboratorium kalibrasi referensi, yaitu Puslit KIM LIPI. Artefak yang digunakan untuk kalibrasi dan uji banding adalah *torque transducer* kapasitas 300 Nm dengan merk CDI (USA), tipe 2000-400-02, nomor seri 1106501

dan indikator tipe 5000-ST. Alat standar torsi yang digunakan di laboratorium referensi adalah *reference torque wrench* dengan merk GTM, tipe DMTS, nomor seri 52701, nomor sertifikat S.040065 dan memiliki ketidakpastian relatif 0,12% yang tertelusur ke satuan SI melalui KRISS, Korea. Metode kalibrasi yang dilakukan di laboratorium referensi adalah metode perbandingan langsung mengacu ke DKD-R 3-8, Germany, 2003.

Prosedur kalibrasi *torque transducer* atau artefak menggunakan kalibrator torsi statik hasil rancang bangun berbeda dengan laboratorium referensi, yaitu mengacu ke standar *Euramet cg-14 Version 2.0* tahun 2011 dengan langkah-langkah kalibrasi seperti yang terlihat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, langkah pengambilan data kalibrasi torsi dilakukan pada empat posisi *transducer* atau alat ukur torsi yang berbeda, yaitu posisi 0° , 90° , 180° dan 270° , dengan jumlah titik pengukuran minimum 5 hanya pada arah naik. Namun untuk mendapatkan hasil evaluasi yang lebih baik, kalibrasi dilakukan pada 10 titik pengukuran torsi dengan persentase kenaikan yang sama sampai kapasitas maksimum. Pada posisi 0° , pengambilan data dilakukan sebanyak dua kali ulangan, diawali dengan tiga kali beban *preloading* sampai kapasitas maksimum. Sedangkan untuk posisi berikutnya, yaitu posisi 90° , 180° dan 270° , pengambilan data dilakukan masing-masing hanya satu kali diawali *preloading* sebelum proses pengambilan data. Gambar 3 menunjukkan keempat posisi *mounting* dari *torque transducer* yang dikalibrasi. Keempat posisi *mounting transducer*, dilakukan dengan membuat alat bantu *fixture* yang mendukung perubahan keempat posisi *transducer* yaitu pada posisi 0° , 90° , 180° dan 270° .



Gambar 2 Langkah pengambilan data kalibrasi torsi static.



Gambar 3 Posisi *mounting* dari *torque transducer* yang dikalibrasi.

Berdasarkan standar *Euramet cg-14 Version 2.0*, prosedur evaluasi hasil pengukuran dan kalibrasi torsi statik terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

a. Penentuan sensitifitas pengukuran.

Sensitifitas pengukuran, S dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S = \frac{\bar{X}_E}{M_E} \quad (15)$$

dimana:

\bar{X}_E : Rata-rata pembacaan pada titik ukur maksimum, Nm.

M_E : Titik ukur maksimum pengukuran torsi, Nm.

b. Penentuan nilai rata-rata pengukuran.

Rata-rata hasil pengukuran, \bar{X} untuk setiap titik ukur dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (I_j - I_{j,0}) \quad (16)$$

dimana:

j : indeks untuk setiap pengukuran ke - j .

n : Jumlah pengukuran naik untuk posisi berbeda.

c. Penentuan daya ulang pembacaan (*Repeatability*).

Daya ulang pembacaan untuk posisi pemasangan alat yang sama harus dihitung untuk setiap titik ukur menggunakan persamaan berikut:

$$b' = |X_1 - X_2| \quad (17)$$

dimana:

X_1 dan X_2 : Nilai yang terukur pada posisi yang sama.

d. Penentuan *reproducibility* pengukuran.

Daya ulang pembacaan untuk posisi yang berbeda (*reproducibility*) dapat dihitung untuk setiap titik ukur menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

dimana:

n : Jumlah pengukuran naik untuk posisi berbeda.

e. Penentuan nilai sisa, f_0 pada pengukuran titik nol torsi.

Penunjukkan titik nol torsi harus direkam sebelum dan sesudah seri pengukuran. Nilai sisa pada titik nol pengukuran dapat dihitung:

$$f_0 = \max |I_f - I_0| \quad (19)$$

f. Penentuan kesalahan terhadap kurva pendekatan (regresi).

Kesalahan terhadap kurva regresi harus dihitung untuk setiap titik pengukuran dimana persamaan regresi dihasilkan dari metode kuadrat terkecil dan nilai kesalahannya dapat dihitung:

$$f_a = (\bar{X} - X_a) \quad (20)$$

g. Penentuan kesalahan penunjukkan.

Kesalahan penunjukkan harus dihitung berdasarkan nilai rata-rata penunjukkan untuk seri pengukuran naik pada semua posisi yang berbeda dan bukan dari nilai hasil persamaan regresi, sehingga dapat dihitung:

$$f_q = (\bar{X} - M_k) \quad (21)$$

h. Penentuan ketidakpastian baku pengukuran.

Hasil kalibrasi alat ukur torsi statik dapat dihitung dengan model matematika sebagai berikut:

$$\bar{X} = (S + \delta S_{b_r} + \delta S_b + \delta S_{f_a}) M_k + \delta X_r \quad (22)$$

dimana:

$M_k = T$: Penunjukkan torsi aktual kalibrator torsi dengan ketidakpastian $u(M_k) = u_{tcm}$

δS_{b_r} : Daya ulang pembacaan (*repeatability*) dengan ketidakpastian $u(\delta S_{b_r}) = \frac{S}{M_k} u_{b_r}$

δS_b : Reprodusibilitas dengan ketidakpastian $u(\delta S_b) = \frac{S}{M_k} u_b$

δS_{f_a} : Kesalahan terhadap kurva regresi dengan ketidakpastian $u(\delta S_{f_a}) = \frac{S}{M_k} u_{f_a}$

δX_r : Kesalahan pengamatan akibat resolusi alat ukur dengan ketidakpastian $u(\delta X_r) = S \cdot u_r \cdot \sqrt{2}$, dimana nilai 2 adalah dua pembacaan untuk satu nilai penunjukkan

Komponen ketidakpastian baku untuk pengukuran torsi dapat dituliskan dalam *budget* ketidakpastian dan diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Budget ketidakpastian pengukuran torsi.

Komponen	Evaluasi ketidakpastian baku	Ketidakpastian baku (Nm)
Daya ulang pembacaan untuk posisi yang sama b'	Tipe A	$u_{b'} = \frac{b'}{S\sqrt{2}}$
Reproduktibilitas untuk posisi berbeda b	Tipe A	$u_b = \frac{b}{S\sqrt{n}}$
Kesalahan terhadap kurva regresi f_a	Tipe B dengan distribusi segi empat	$u_{f_a} = \frac{ f_a }{S\sqrt{6}}$
Resolusi r	Tipe B dengan distribusi segi empat	$u_r = \frac{r}{\sqrt{12}}$
Torsi standar	Tipe B	u_{tcm}

Ketidakpastian baku $u(\bar{X})$ diperoleh dari hukum propagasi kesalahan sebagai pendekatan untuk variabel yang tak saling berkorelasi dan dapat dihitung:

$$u(\bar{X}) = \sqrt{\sum_{i=1}^s \left(\frac{\delta \bar{X}}{\delta x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (23)$$

dengan

$$u^2(\bar{X}) = S^2(u_{tcm}^2 + u_{b'}^2 + u_b^2 + 2u_r^2 + u_{f_a}^2) \quad (24)$$

Ketidakpastian pengukuran terentang U untuk setiap titik ukur yang dikalibrasi dapat dihitung:

$$U = k \cdot u(\bar{X}) \quad (25)$$

Selanjutnya, setelah evaluasi hasil dan ketidakpastian pengukuran atau kalibrasi artefak, maka dilakukan uji banding hasil kalibrasi. Menurut KAN-G-03 (2011), kriteria keberterimaan hasil uji banding laboratorium kalibrasi dapat diestimasi secara kuantitatif berdasarkan nilai kesalahan yang dinormalisasi, nilai E_n , dimana $|E_n| < 1$. Semakin mendekati nilai 0, maka hasil uji banding semakin baik atau nilainya semakin dekat dengan laboratorium referensi. Nilai E_n dapat dihitung dengan persamaan:

$$E_n = \frac{Lab - Ref}{\sqrt{(U^2 Lab + U^2 Ref)}} \quad (26)$$

dimana:

Lab : Penunjukkan aktual laboratorium.

Ref : Penunjukkan aktual referensi.

U : Ketidakpastian terentang pada tingkat kepercayaan 95%.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi standar bobot mati merupakan langkah awal dalam penentuan torsi aktual dan ketidakpastian pengukuran kalibrator torsi statik hasil rancang bangun Tabel 2 menunjukkan hasil kalibrasi massa standar bobot mati. Kalibrasi dilakukan oleh laboratorium kalibrasi massa Puslit KIM LIPI menggunakan anak timbangan standar kelas E2 nomor seri 269 yang tertelusur ke satuan SI melalui KRIS Korea. Nomor massa bobot mati yang tertera sebagai identitas massa dimulai dengan nomor 0 sampai 9.

Tabel 2 Hasil kalibrasi massa standar bobot mati, m .

No. bobot mati	Massa Nominal, g	Massa Konvensional, g	Ketidakpastian, $U_m \pm g$
0	5000	4999.343	0.008
1	5000	4999.258	0.008
2	5000	4999.507	0.008
3	5000	4999.316	0.008
4	5000	4999.59	0.008
5	5000	4999.38	0.008
6	5000	4999.51	0.008
7	5000	4999.058	0.008
8	5000	4999.387	0.008
9	5000	4999.997	0.008

Selanjutnya adalah pengukuran dan kalibrasi parameter-parameter lain yang berpengaruh. Kalibrasi panjang lengan dilakukan menggunakan standar panjang *linear scale* yang sudah terkalibrasi. Hasil kalibrasi panjang lengan memiliki panjang aktual 0,500368 m dengan ketidakpastian $\pm 0,000012$ m. Massa bobot mati yang digantung pada lengan menggunakan *weight carrier* dan tali baja. Kedalaman alur tali baja pada *weight carrier* memiliki kedalaman aktual 0,00157 m dan ketidakpastian $\pm 0,00001$ m. Tali baja yang digunakan memiliki diameter aktual 0,003092 m dengan ketidakpastian $\pm 0,000002$ m. Deformasi arah lateral pada lengan diukur menggunakan LVDT dengan deformasi maksimum 0,0001281 m dan ketidakpastian $\pm 0,0000064$ m. Sehingga dengan memperhitungkan parameter-parameter yang berpengaruh tersebut, panjang lengan gabungan memiliki nilai aktual $L = 0,5004721$ m dengan ketidakpastian total $U_L = \pm 0,0000304$ m.

Kondisi ruangan laboratorium pada saat kalibrasi memiliki variasi perbedaan temperatur, $\theta = \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ terhadap temperatur referensi $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ dengan ketidakpastian $U_\theta = 0,85 \text{ } ^\circ\text{C}$. Massa jenis

udara konvensional, ρ_u adalah $1,2 \text{ kg/m}^3$ dengan ketidakpastian, U_{ρ_u} di estimasi $\pm 10\%$. Lengan torsi terbuat dari material *stainless steel* dengan koefisien muai termal, $\alpha = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ dan massa jenis, $\rho_m = 8000 \text{ kg/m}^3$. Nilai gravitasi lokal di lokasi pada saat kalibrasi, g_L adalah $9,77963634 \text{ m/s}^2$ dengan ketidakpastian $U_{g_L} = 0,0000014 \text{ m/s}^2$. Berdasarkan data-data tersebut, maka besarnya torsi aktual M_k dan ketidakpastian pengukuran kalibrator torsi statik U_{M_k} dapat dievaluasi dengan mengacu ke persamaan 1 sampai 14, hasil pengukuran untuk masing-masing titik ukur sesuai dengan nomor massa bobot mati ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil evaluasi torsi aktual kalibrator.

Kode Bobot Mati	Penunjukkan Aktual, M_k (Nm)	Ketidakpastian, $U_{M_k} \pm$ (Nm)
0	24.466	0.002
1	48.931	0.003
2	73.398	0.005
3	97.864	0.006
4	122.331	0.008
5	146.797	0.010
6	171.263	0.011
7	195.728	0.013
8	220.194	0.015
9	244.663	0.016

Berdasarkan hasil evaluasi, maka ketidakpastian terbesar kalibrator torsi statik hasil rancang bangun adalah $\pm 0,016 \text{ Nm}$ atau $\pm 0,01 \%$ terhadap skala penuhnya. *Budget* evaluasi ketidakpastian untuk salah satu titik ukur (titik maksimum pengukuran) ditunjukkan pada Tabel 4. Berdasarkan hasil penentuan torsi aktual dan ketidakpastian kalibrator torsi, maka evaluasi unjuk kerja berupa evaluasi hasil kalibrasi artefak *torque transducer* dapat dihitung dengan mengacu ke persamaan (15) sampai (25). Tabel 5 menunjukkan hasil kalibrasi artefak menggunakan kalibrator torsi hasil rancang bangun dimana kesalahan maksimum sebesar $0,77 \text{ Nm}$ dan ketidakpastian pengukuran maksimum sebesar $\pm 0,55 \text{ Nm}$ sehingga akurasi artefak yang dikalibrasi dapat diestimasi sebesar $0,52\%$ terhadap skala penuhnya. Contoh *budget* evaluasi ketidakpastian pengukuran untuk titik ukur maksimum ditunjukkan pada Tabel 6. Parameter yang berkontribusi terhadap hasil evaluasi ketidakpastian pengukuran adalah daya ulang pembacaan b' , reproduibilitas b , kesalahan terhadap kurva regresi F_a , resolusi alat ukur r dan ketidakpastian standar kalibrator torsi hasil rancang bangun U_{tcm} .

Tabel 4 Budget ketidakpastian kalibrator torsi untuk titik pengukuran maksimum.

Par.	U	Dist.	Div	vi	ui	ci	uici	(uici)^2	(uici)^4/vi
1. m	8.00E-05	norm.	2.00	60	4.E-05	5.E+00	2.E-04	4.E-08	2.E-17
2. ρ_u	1.20E-01	rect.	1.73	1000	7.E-02	-3.E-02	-2.E-03	4.E-06	2.E-14
3. ρ_m	8.00E+02	rect.	1.73	1000	5.E+02	5.E-06	2.E-03	4.E-06	2.E-14
4. g_L	1.40E-06	norm.	2.00	60	7.E-07	3.E+01	2.E-05	3.E-10	2.E-21
5. L	3.04E-05	norm.	2.00	60	2.E-05	5.E+02	7.E-03	6.E-05	5.E-11
6. α	1.15E-06	rect.	1.73	1000	7.E-07	5.E+02	3.E-04	1.E-07	1.E-17
7. θ	8.50E-01	norm.	2.00	60	4.E-01	3.E-03	1.E-03	1.E-06	3.E-14
Jumlah								6.58E-05	5.09E-11
Ketidakpastian baku gabungan, U_c								0.008	
Derajat kebebasan efektif, $veff$								8.50E+01	
Faktor cakupan, k-student's untuk $veff$ and CL 95%								1.988	
Ketidakpastian bentangan, $U_e = k.U_c$								0.016 Nm	

Tabel 5 Hasil kalibrasi artefak menggunakan kalibrator torsi hasil rancang bangun.

Kode Bobot Mati	Penunjukkan Standar, Nm	Penunjukkan Alat, Nm	Kesalahan, Nm	Ketidakpastian, $U \pm$ Nm
0	24.54	24.64	0.10	0.19
1	48.98	49.16	0.18	0.24
2	73.48	73.72	0.25	0.27
3	97.95	98.27	0.32	0.32
4	122.44	122.83	0.40	0.32
5	146.90	147.37	0.47	0.35
6	171.38	171.92	0.54	0.40
7	195.79	196.40	0.62	0.45
8	220.27	220.96	0.69	0.49
9	244.72	245.49	0.77	0.55

Tabel 6 Budget ketidakpastian artefak untuk titik pengukuran maksimum.

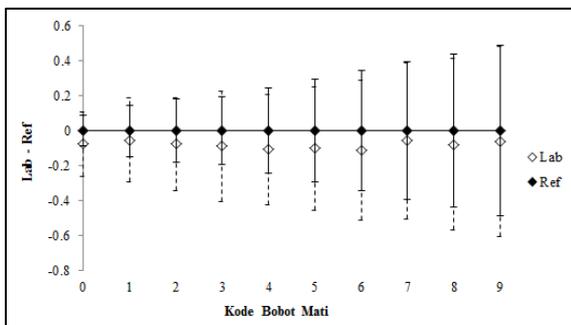
Par.	U	Dist.	Div.	vi	ui	ci	uici	(uici)^2	(uici)^4/vi
1. b'	8.0E-02	normal	1.41	60	0.057	1	5.7E-02	3.2E-03	1.7E-07
2. b	7.6E-02	rect.	2.00	1000	0.038	1	3.8E-02	1.5E-03	2.1E-09
3. F_a	6.6E-01	rect.	2.45	1000	0.269	1	2.7E-01	7.3E-02	5.3E-06
4. r	1.0E-02	normal	3.46	60	0.003	1.4	4.1E-03	1.7E-05	4.7E-12
5.	1.6E-02	normal	2.00	60	0.008	1	8.1E-03	6.5E-05	7.0E-11
U_{tcm}									
Jumlah								7.7E-02	5.4E-06
Ketidakpastian baku gabungan, U_c								0.278	
Derajat kebebasan efektif, $veff$								1.1E+03	
Faktor cakupan, k-student's untuk $veff$ and CL 95%								1.962	
Ketidakpastian bentangan, $U_e = k.U_c$								0.545	Nm

Mengacu ke persamaan (15), nilai kesalahan yang dinormalisasi, E_n dapat dihitung dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7, dimana Ref adalah hasil kalibrasi laboratorium referensi dan Lab adalah hasil kalibrasi menggunakan kalibrator torsi hasil rancang bangun. Berdasarkan perhitungan untuk seluruh titik ukur yang dikalibrasi, semua nilai $|E_n| < 1$, sehingga memenuhi kriteria yang di persyaratkan oleh KAN-G-03 (2011). Nilai $|E_n|$ terbesar terdapat pada bobot mati nomor 0 sebesar 0,37190 sedangkan yang terkecil terdapat pada bobot mati nomor 9 sebesar 0,08396. Semakin mendekati nilai 0, maka hasil kalibrasi yang dilakukan oleh laboratorium menggunakan kalibrator torsi semakin baik, artinya semakin mendekati hasil yang diperoleh laboratorium referensi.

Gambar 4 menunjukkan perbedaan kesalahan yang diperoleh dari hasil uji banding. Kalibrator torsi statik hasil rancang bangun menunjukkan unjuk kerja berupa kesalahan dan ketidakpastian pengukuran yang memenuhi persyaratan. Perbedaan kesalahan terbesar terhadap hasil kalibrasi laboratorium referensi adalah 0,11 Nm berada pada bobot mati nomor 6, sedangkan yang paling mendekati hasil kalibrasi laboratorium referensi adalah pada bobot mati nomor 1 dengan perbedaan 0,05 Nm. Namun secara keseluruhan, hasil kalibrasi artefak menggunakan kalibrator torsi hasil rancang bangun berhasil memenuhi persyaratan dan layak untuk digunakan sebagai standar kalibrator untuk pengukuran torsi statik.

Tabel 7 Hasil Perhitungan nilai E_n sebagai kriteria keberterimaan hasil uji banding.

Kode Bobot Mati	Ref		Lab		En
	Kesalahan Ref, Nm	Ketidakpastian, $U \pm$ Nm	Kesalahan Lab, Nm	Ketidakpastian, $U \pm$ Nm	
0	0.10	0.09	0.18	0.19	-0.37190
1	0.18	0.15	0.23	0.24	-0.18878
2	0.25	0.18	0.33	0.27	-0.23879
3	0.32	0.20	0.41	0.32	-0.23572
4	0.40	0.24	0.50	0.32	-0.26695
5	0.47	0.29	0.57	0.35	-0.22455
6	0.54	0.34	0.66	0.40	-0.21361
7	0.62	0.39	0.68	0.45	-0.09781
8	0.69	0.44	0.77	0.49	-0.11886
9	0.77	0.49	0.83	0.55	-0.08396



Gambar 4 Perbedaan kesalahan dan ketidakpastian pengukuran hasil uji banding.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi, kalibrator torsi statik hasil rancang bangun memiliki ketidakpastian pengukuran maksimum ± 0.016 Nm atau ± 0.01 % terhadap skala penuhnya. Kemudian berdasarkan hasil uji banding kalibrasi dengan laboratorium referensi menggunakan artefak yang sama, perbedaan terbesar terdapat pada bobot mati nomor 6 yaitu 0,11 Nm, sedangkan yang paling mendekati hasil kalibrasi laboratorium referensi adalah bobot mati nomor 1 dengan perbedaan 0,05 Nm. Nilai E_n untuk seluruh titik ukur berhasil memenuhi kriteria yang di persyaratkan, dimana semua nilai $|E_n| < 1$, artinya perbedaan akurasi hasil pengukuran dengan sistem referensi masih berada dalam batas yang dapat diterima sehingga hasil pengukuran kalibrator tersebut dapat dipercaya dan layak digunakan sebagai alat standar untuk mengkalibrasi peralatan ukur torsi statik di industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala UPT BPI LIPI yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui kegiatan penelitian Tematik LIPI tahun 2013 dengan Nomor 3245.001.012, Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepadatim penelitian seksi pengembangan metode pengukuran UPT BPI LIPI atas dukungan dan bantuan yang telah diberikan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen C. L., Wang J.J., Chiu H. S. (2013). *Proficiency testing criteria for clearance level in solid waste gamma measurement in Taiwan*, Applied Radiation and Isotopes, Hal.32-35.
- Euramet cg-14 Version 2.0. (2011). *Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices*, European Association of National Metrology Institutes, EURAMET.
- Ferrero, C. (2009). *The equivalence in accreditation: Robust or standard statistical analysis of interlaboratory comparisons*, Measurement, Hal. 1541-1545.
- Heuillet, M, Lalere B., Peignaux M., De Graeve J., Vaslin-Reimann S., Pais De Barros J.P., Gambert P., Duvillard L. dan Delatour V. (2013). *Validation of a reference method for total cholesterol measurement in human serum and assignation of reference values to proficiency testing samples*, Clinical Biochemistry, Hal. 359-364.

- JCGM 100:2008. (2008). *GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, BIPM.
- KAN-G-03. (2011). *KAN Guide on conducting proficiency testing Issue Number : 3*, Komite Akreditasi Nasional (KAN).
- Miller, W. Greg. (2009). *The role of proficiency testing in achieving standardization and harmonization between laboratory*, Clinical Bio Chemistry, Hal. 232-235.
- OIML R 111-1. (2004). *International Recommendation, Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3, Part 1: Metrological and technical requirements*, International Organization of Legal Metrology (OIML).
- Powell J., Matthew C. J, Cussens J, MacLeod N. dan Penkman K. (2013). *Results from an amino acid racemization inter-laboratory proficiency study; design and performance evaluation*, Quaternary Geochronology, Elsevier B.V.
- Rochim, Taufiq. (2006). *Perancangan penelitian dan analisis data statistika*, Penerbit Institut Teknologi Bandung ITB, Bandung.
- SNI ISO/IEC 17025:2008. (2008). *Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi*, Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- Wenda Permana. (2005). *Penentuan Target Ketidakpastian Pengukuran Pada Pembuatan Torsimeter Bobot Mati*, Pusat Penelitian Kalibrasi, Instrumentasi, dan Metrologi (KIM)-LIPI.

