

METODE TAC SEMI-OTOMATIS SEDERHANA UNTUK MEMANDU KALIBRASI DWT PNUMATIK

A Simple Semi-Automatic TAC Method to Guide Pneumatic DWT Calibration

R. Rudi Anggoro Samodro dan Adindra Vickar Ega

Pusat Penelitian Metrologi LIPI
Kompleks PUSPIPTEK Gedung 420, Setu, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia
e-mail: rasamodro@gmail.com

Diterima: 8 Desember 2017, Direvisi: 19 Januari 2018, Disetujui: 22 Januari 2018

Abstrak

Telah dikembangkan metode *transducer assisted crossfloat* (TAC) semi-otomatis sederhana berbasis *Visual Basic Application* (VBA) yang bertujuan untuk memperoleh metode yang lebih sederhana, mudah dan relatif handal dalam mengkalibrasi DWT pnumatik. Pengoperasian dua *valve* untuk menghubungkan *transducer* dengan DWT dilakukan secara manual, mengikuti panduan yang muncul (*pop-up message*) pada antar-muka perangkat lunak. Data akuisisi pembacaan tekanan DWT standar dan DWT yang dikalibrasi dilakukan secara otomatis dengan menggunakan *pressure transducer* melalui komunikasi serial RS232. Beda tekanan antara kedua DWT (Δp) dikonversi menjadi massa penyetimbang (m_b) berdasarkan *pressure factor* (f_p) dari *pressure transducer*. Dilakukan kalibrasi DWT gas dari 200 kPa - 1750 kPa pada 11 titik dengan 3 seri pengukuran menggunakan metode ini. Nilai pengulangan dari m_b metode TAC semi-otomatis relatif kecil dengan standar deviasi maksimum sebesar 96 mg pada tekanan 1750 kPa. Parameter utama DWT yang dikalibrasi yaitu luasan efektif piston-silinder ($A_{0,20}$) dan koefisien distorsi (λ), dengan hasil secara berturut-turut adalah $(4,901\ 65 \times 10^{-5} \pm 6,0 \times 10^{-9})\ m^2$ dan $(2,1 \times 10^{-12} \pm 3,9 \times 10^{-12})\ Pa^{-1}$. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan hasil kalibrasi DWT yang sama dengan metode *crossfloat* umum. Dari validasi yang dilakukan, konsistensi dari kedua metode yang cukup tinggi untuk nilai $A_{0,20}$ dengan perbedaan relatif kurang dari 1×10^{-6} , sedangkan selisih dari nilai λ sebesar $2,4 \times 10^{-12}\ Pa^{-1}$ yang masih tercakup pada rentang ketidakpastiannya yaitu sebesar $4,4 \times 10^{-12}\ Pa^{-1}$. Metode ini cukup efektif dan efisien terbukti dari konsistensi hasil yang diperoleh, terlebih lagi kalibrasi dilakukan oleh operator dengan hanya mengikuti perintah yang ditampilkan oleh perangkat lunak.

Kata kunci: kalibrasi DWT, *transducer assisted crossfloat*, semi-otomatis, VBA.

Abstract

A simple semi-automatic TAC method based on VBA to calibrate DWT, has been developed. The aim is to get a simple, easy but reliable to calibrate DWT. The operation of two valves which connected the transducer with DWTs is done manually, according to the pop-up message on the software interface. On the other hand, data acquisition of pressure reading from the standard DWT and the DWT under calibration is done automatically by using pressure transducer through RS232 serial. Pressure difference between DWTs (Δp) is then converted to balancing mass (m_b) according to the pressure factor (f_p) of pressure transducer. Calibration of pneumatic DWT in range of 200 kPa to 1750 kPa with 11 pressure point and 3 measurements series has been done using this method. The repeatability of m_b is relatively small with maximum standard deviation of 96 mg at 1750 kPa. The main parameters of the DWT which are effective area at null pressure and 20 °C ($A_{0,20}$) and distortion coefficient (λ), resulting $(4.901\ 65 \times 10^{-5} \pm 6.0 \times 10^{-9})\ m^2$ and $(2.1 \times 10^{-12} \pm 3.9 \times 10^{-12})\ Pa^{-1}$, respectively. Those value then being compared with the conventional crossfloat methods results. The validation shows that the results from both methods are consistent with relative difference of $A_{0,20}$ less than 1×10^{-6} , whereas the difference of λ is $2.4 \times 10^{-12}\ Pa^{-1}$, relevant with the uncertainty statement which is $4.4 \times 10^{-12}\ Pa^{-1}$. This method is sufficiently effective and efficient according to the above results, moreover the calibration was performed by the operator who just follows the instruction shown by the software.

Keywords: DWT calibration, *transducer assisted crossfloat*, semi-automatic, VBA.

1. PENDAHULUAN

Pengukuran tekanan yang akurat dan presisi sangat dibutuhkan di berbagai bidang, misal militer, minyak dan gas bumi, dan aviasi. Di bidang militer, pengukuran tekanan pada senjata berkaliber besar sangat penting, karena akan

menentukan keseimbangan antara keselamatan kru dan efektivitas tempur (Choi, Yang, & Woo, 2013). Ketetapan dalam standar mutu modern seperti ISO 9000 untuk sistem manajemen mutu menjadikan ketertelusuran pengukuran menjadi bagian yang sangat penting dari jaminan mutu. Kesadaran masyarakat tentang pentingnya

pengukuran yang akurat juga menyebabkan kebutuhan ketertelusuran melalui proses kalibrasi menjadi semakin meningkat. Sebagai konsekuensinya, Puslit Metrologi LIPI sebagai lembaga acuan nasional selalu berupaya memberikan pelayanan yang prima di bidang kalibrasi. Berbagai penelitian dan pengembangan dilakukan untuk dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas metode yang ada selain meningkatkan akurasi diseminasi ke Sistem Internasional Satuan Ukuran (SI) yang diberikan melalui layanan kalibrasi peralatan ukur.

DWT merupakan standar tekanan tertinggi pada lingkup tekanan yang sudah digunakan secara luas. DWT memiliki bagian utama yaitu seperangkat beban (m) dan *piston-cylinder assembly* (PCA) yang memiliki parameter luas efektif piston-silinder pada tekanan nol gauge dan suhu acuan ($A_{0,20}$) dan koefisien distorsi (λ) (EURAMET, 2011). Parameter-parameter DWT tersebut perlu dikalibrasi karena nilainya dapat berubah tergantung pada perawatan, kestabilan dan beban kerja yang akan mempengaruhi nilai tekanan yang dihasilkan.

Metode kalibrasi DWT yang paling umum digunakan hingga kini adalah metode *crossfloat*. Metode ini menentukan kesetimbangan tekanan antara kedua DWT yang dikomparasi berdasarkan karakteristik laju turun atau *fall rate* dari kedua piston. Dengan menambahkan massa penyetimbang ke DWT yang memiliki tekanan yang lebih rendah, ditandai dengan pergerakan piston keatas (nilai *fall rate* positif), maka akan diperoleh kesetimbangan tekanan antar kedua DWT. Metode ini sangat akurat, namun pada pelaksanaannya membutuhkan operator dengan *skill* yang tinggi, sehingga tidak sedikit operator yang mengalami kesulitan dalam melakukan kalibrasi DWT secara manual dengan metode *crossfloat* (Olson & Driver, 2013). Kesulitan utama yang dialami operator adalah laju turun piston yang terlalu cepat atau terlalu lambat atau bahkan tidak responsif. Hal ini dapat disebabkan oleh kondisi fisik piston-silinder yang menurun akibat penggunaan, yang menyebabkan permukaan piston-silinder tergores. Selain itu dengan jarak antara piston dan silinder yang mampu mencapai orde 0,3 μ m menyebabkan permukaan keduanya mudah kotor karena terkontaminasi medium tekanan yang digunakan.

Selain metode *crossfloat*, ada metode lain yang masih jarang digunakan yaitu metode *transducer assisted crossfloat* (TAC). Metode ini menentukan masa penyetimbang yang dibutuhkan dalam kalibrasi DWT, berdasarkan perbedaan tekanan dari kedua DWT yang dibaca

pressure transducer. Puslit Metrologi LIPI sendiri baru saja berhasil mengimplementasikan metode TAC full-otomatis yang digunakan pada kalibrasi DWT hidraulik sampai dengan 200 MPa (Samodro, 2016). Metode ini relatif lebih mudah karena tidak membutuhkan *skill* operator yang tinggi. Akan tetapi, metode ini membutuhkan *transducer* yang akurat untuk memperoleh hasil sebaik metode *crossfloat*. *Transducer* pada metode ini, digunakan sebagai *pressure indicator* untuk membaca tekanan dari kedua DWT secara bergantian sehingga dapat diketahui perbedaan tekanannya (Olson & Driver, 2013). Selain itu, dibutuhkan peralatan pendukung, baik berupa perangkat keras ataupun perangkat lunak yang memadai untuk bisa melakukannya secara otomatis.

Di Indonesia masih belum banyak laboratorium kalibrasi yang mampu melakukan kalibrasi DWT baik dengan metode *crossfloat* apalagi dengan menggunakan metode TAC. Untuk itulah, penulis mengembangkan metode TAC semi-otomatis ini untuk dapat diimplementasikan oleh laboratorium kalibrasi yang ingin membuka lingkup kalibrasi DWT. Semi-otomatis disini ditujukan untuk meminimalisasi kebutuhan pendukung, terutama perangkat keras yang dibutuhkan untuk melakukan kalibrasi DWT dengan metode TAC secara full-otomatis. Selain itu, perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan *Visual Basic Application* (VBA) pada *Excel* yang umum dimiliki semua orang, sehingga tidak membutuhkan perangkat lunak khusus lainnya.

Puslit Metrologi LIPI berencana mengembangkan dan mengimplementasikan metode TAC full-otomatis pada sistem kalibrasi DWT pnumatik sampai dengan 7 MPa, setelah berhasil mengimplementasikan-nya pada sistem kalibrasi DWT hidraulik. Akan tetapi saat ini, masih dalam tahap pengembangan otomatisasi dari *ball-valve* yang digunakan. Untuk itulah, makalah ini menjelaskan sebatas metode TAC semi-otomatis yang dikembangkan pada sistem kalibrasi DWT pnumatik. Hal ini bertujuan untuk menunjukkan mudahnya kalibrasi DWT dengan menggunakan metode TAC semi-otomatis. Harapannya, operator yang belum memiliki *skill* maupun pengalaman yang tinggi tetap dapat melakukan kalibrasi DWT dengan baik.

Hasil kalibrasi DWT pnumatik dengan metode TAC semi-otomatis pada penelitian ini diverifikasi dengan cara membandingkannya dengan hasil kalibrasi DWT pnumatik menggunakan metode *crossfloat* yang umum digunakan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pressure Balance atau DWT, merupakan standar tekanan yang dapat merealisasi satuan tekanan (p) berdasarkan gaya berat (W) dari massa pembeban terhadap luas efektif piston-silinder (A), seseuai persamaan berikut:

$$p = \frac{W}{A} \quad (1)$$

Gaya berat (W) dapat disebabkan oleh :

$$W = \sum m_i g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \quad (2)$$

dimana :

- m_i = massa pembeban yang bekerja pada piston-silinder, kg
- g = percepatan gravitasi lokal, m.s⁻²
- ρ_a = densitas udara, kg.m⁻³
- ρ_m = densitas beban, kg.m⁻³

Sedangkan luas efektif piston-silinder (A) dipengaruhi oleh :

$$A = A_{p,20} (1 + \alpha [t - 20]) \quad (3)$$

dimana :

- $A_{p,20}$ = luas piston-silinder pada tekanan p dan suhu referensi 20 °C, m²
- α = nilai koefisien muai termal, °C⁻¹
- t = suhu ruang, °C

Luasan piston-silinder (A) dapat berubah terhadap suhu apabila DWT digunakan pada suhu ruang yang berbeda dengan suhu acuan. Selain itu, A juga terdistorsi terhadap perubahan tekanan seperti yang dijelaskan pada Persamaan 4.

$$(A_{p,20})_T = (A_{0,20}) (1 + \lambda p_n) \quad (4)$$

dimana :

- $A_{0,20}$ = luas piston-silinder pada tekanan nol dan suhu referensi 20 °C, m²
- λ = koefisien distorsi tekanan, Pa⁻¹
- p_n = tekanan nominal, Pa

DWT memiliki parameter utama yang dikalibrasi yakni berupa massa (m), luasan efektif piston-silinder ($A_{0,20}$) dan koefisien distorsi (λ). Ketertelusuran massa dapat diperoleh dari laboratorium massa, yang pada umumnya melalui komparasi dengan anak timbangan standar yang sesuai. Sedangkan 2 parameter lainnya, yaitu $A_{0,20}$ dan λ dapat diperoleh dari

laboratorium tekanan, melalui komparasi langsung terhadap DWT standar.

Dalam prinsip kalibrasi DWT melalui komparasi, tekanan yang dihasilkan oleh DWT yang dikalibrasi (P_{uut}), dibandingkan dengan tekanan yang dihasilkan dari DWT standar (P_{std}), seperti pada Persamaan 5.

$$P_{std} = P_{uut} \quad \dots (5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 1 pada persamaan 5, didapat :

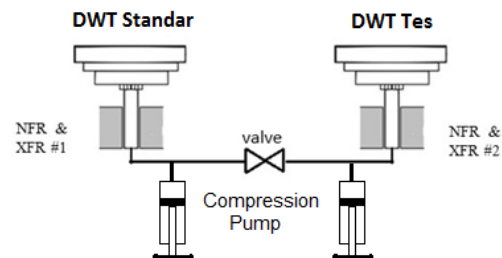
$$W_{std} / A_{std} = W_{uut} / A_{uut} \quad \dots (6)$$

Dengan parameter-parameter DWT standar yang sudah diketahui, maka parameter DWT yang dikalibrasi (A_{uut}) dapat diketahui dengan melalui Persamaan 7 (Ega & Samodro, 2014).

$$A_{uut} = W_{uut} * A_{std} / F_{std} \quad \dots (7)$$

Ada beberapa metode kalibrasi atau metode komparasi DWT yang digunakan untuk mendapatkan nilai parameter-parameter DWT, antara lain: metode *crossfloat* dan metode *transducer assisted crossfloat* (TAC).

a. Metode *crossfloat*



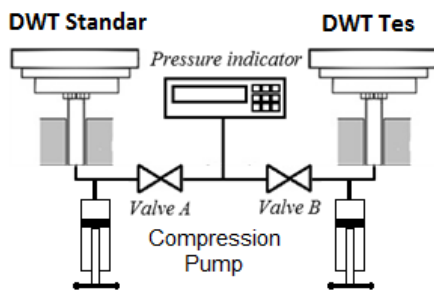
Gambar 1 Kalibrasi DWT dengan metode *Crossfloat*, modifikasi (Samodro & Ega, 2016).

Metode *cross-float* adalah metode penentuan kesetimbangan tekanan berdasarkan karakteristik dari laju turun alamiah (*natural fall rate* - *NFR*) piston yang dibandingkan dengan laju turun piston pada saat dikomparasi (*cross fall rate* - *XFR*) (Kobata, 2011). Tekanan yang dihasilkan dari kedua DWT yang dikomparasi dinyatakan setimbang apabila, *NFR* dari masing-masing piston bernilai sama atau mendekati dari *XFR*-nya. *NFR* diukur pada saat *valve* atau katup ditutup, sedangkan *XFR* diukur pada saat *valve* dibuka. Kesetimbangan tekanan dapat diperoleh dengan cara menambahkan massa penyetimbang (m_b) pada salah satu piston yang memiliki tekanan yang lebih rendah (Ega & Samodro, 2015). Laju turun dari piston bisa

diukur menggunakan sensor kapasitansi, laser atau yang paling konvensional menggunakan bantuan mistar dan *stop watch* (Fitzgerald, Sutton, & Jack, 2007). *Compression pump* digunakan untuk mengatur tinggi awal piston sebelum dilakukan pengukuran NFR ataupun XFR.

Keunggulan dari metode ini adalah keakurasiannya karena penentuan kesetimbangan tekanan berdasarkan *fall rate* yang merupakan karakteristik dasar dari DWT. Akan tetapi, karena kesetimbangan tekanan tidak ditentukan secara langsung berdasarkan nilai tekanan melainkan *fall rate*, hanya operator yang berpengalaman yang bisa melakukan kalibrasi DWT dengan metode ini dan tingkat kesulitannya akan bertambah apabila mendapatkan DWT yang memiliki piston yang tidak sensitif (Ega & Samodro, 2017).

b. Metode TAC



Gambar 2 Kalibrasi *pressure balance* dengan metode TAC.

Sumber: Samodro & Ega (2016).

Metode ini menggunakan *transducer* berupa *pressure indicator* untuk membaca tekanan dari DWT standar (p_s) dan DWT tes atau yang dikalibrasi (p_T) secara bergantian untuk memperoleh konfigurasi S-T-S-T-S (S untuk p_s dan T untuk p_T), dengan mengoperasikan dua *valve* atau katup yang sesuai (Olson & Kobata, 2002). Perbedaan pembacaan tekanan antara kedua DWT (Δp) akan dikonversikan untuk menentukan massa penyetimbang (m_b) yang perlu ditambahkan supaya tekanan kedua DWT tersebut menjadi setimbang (Kobata & Olson, 2005).

Kelebihan metode ini adalah pada kemudahan penentuan kesetimbangan tekanan yang langsung menunjukkan nilai tekanan karena menggunakan *transducer*. Disisi lain, hasil akurasi akan sangat tergantung pada akurasi *transducer* yang digunakan.

Pada metode TAC manual, pengoperasian dua *valve* (A dan B) dan pembacaan tekanan (p_s dan p_T) beserta penentuan perbedaan tekanan dari kedua DWT (Δp) dilakukan secara manual. Oleh karena itu, konsistensi interval waktu pengoperasian *valve* dan pembacaan nilai tekanan pada *transducer* akan subjektif tergantung pada operatornya dan hasilnya akan berpengaruh terhadap hasil pengukuran.

Pada metode TAC *full*-otomatis, pengoperasian dua *valve* dilakukan secara otomatis dengan menggunakan mikrokontroler (Kobata, 2007). Begitu juga dengan pembacaan p_s dan p_T dari *pressure indicator* dilakukan dengan menggunakan sistem data akuisisi otomatis, yang semuanya dilakukan komputer dengan menggunakan perangkat lunak tertentu (Kobata, Kojima, Kajikawa, & Iizumi, 2017). Bila *transducer* yang digunakan cukup akurat maka hasil kalibrasi DWT menggunakan metode ini sama akuratnya dengan metode *crossfloat*. Kontribusi operator terhadap kesalahan hasil kalibrasi tidak ada, karena penentuan kesetimbangan tekanan dilakukan secara otomatis. Akan tetapi dengan membutuhkan peralatan dukung lebih banyak dan rumit, baik perangkat keras maupun lunak, maka metode ini membutuhkan biaya yang cukup mahal. Selain itu, untuk mengembangkan metode ini dibutuhkan pengetahuan yang sangat baik berkaitan dengan perangkat keras maupun lunak. Oleh karena itulah Puslit Metrologi LIPI baru berhasil mengimplementasikan Metode TAC otomatis ini untuk kalibrasi DWT hidraulik saja (Samodro & Ega, 2016).

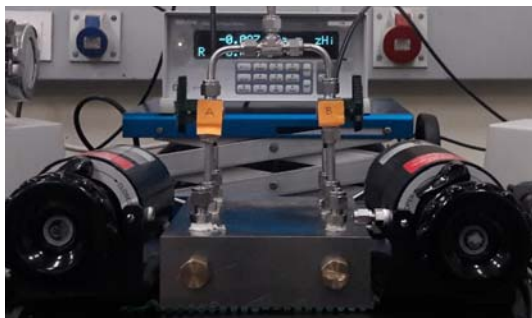
Metode TAC semi-otomatis yang direkomendasikan ini, diharapkan dapat menjadi jembatan antara implementasi TAC manual dan TAC full-otomatis pada lingkup kalibrasi DWT pneumatik sampai dengan rentang tekanan 7 MPa dan diharapkan dapat memiliki akurasi yang tinggi mendekati metode *crossfloat*. Selain lebih sederhana dan berbiaya rendah karena tidak membutuhkan mikrokontroler, metode ini sangat mudah karena operator tinggal mengikuti panduan yang muncul pada layar monitor secara konsisten sehingga kemampuan ulangnya tinggi. Pada metode ini, data akuisi p_s dan p_T dari *pressure indicator* dilakukan komputer melalui komunikasi serial RS232 menggunakan perangkat lunak yang dikembangkan sendiri berbasis *Visual Basic Application* (VBA) pada excel. Sedangkan pengoperasian dua *valve* (A dan B) dilakukan secara manual, menunggu panduan berupa *pop-up message* dari perangkat lunak yang dibangun, agar waktu pengoperasian selalu konsisten.

3. METODE PENELITIAN

Untuk mengembangkan metode *transducer assisted crossfloat* (TAC) semi-otomatis ini, dilakukan dua modifikasi utama pada sistem kalibrasi DWT pnumatik yang dimiliki Puslit Metrologi LIPI yang pada awalnya menggunakan *crossfloat* dengan konfigurasi seperti pada Gambar 1.

a. Perangkat keras

Modifikasi dilakukan dengan menambahkan *transducer* sebagai *pressure indicator* berupa *Reference Pressure Monitor* (RPM4) dengan kapasitas 7 MPa dan memiliki resolusi 1 Pa. Selain itu ditambahkan 1 *valve* lagi sehingga *pressure indicator* berada diantara 2 *valve* yang mengisolir tekanan dari DWT seperti konfigurasi sistem pada Gambar 2. *Valve* yang digunakan adalah tipe *ball-valve* (Gambar 3) untuk menjaga volume tetap konstan selama pengoperasian (buka-tutup) *valve* agar pembacaan tekanan DWT pada *pressure indicator* lebih stabil.

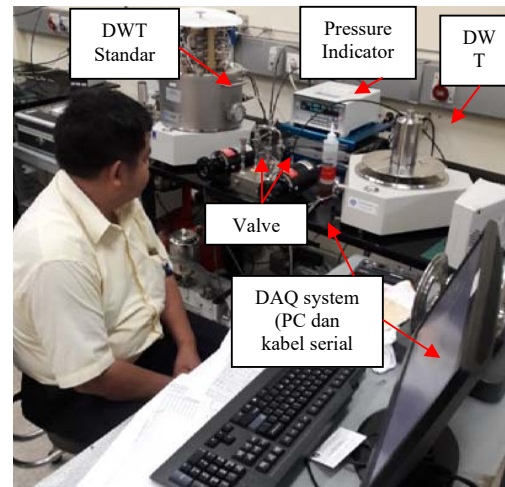


Gambar 3 Dua *Ball-valve* (A dan B) yang digunakan untuk menghubungkan tekanan masing-masing DWT ke *transducer*.

DWT pnumatik standar yang digunakan dalam penelitian ini adalah DHI P7601 dengan rentang tekanan sampai dengan 1750 kPa, sedangkan DWT pnumatik tes yang dikalibrasi adalah DHI P7601 dengan rentang tekanan sampai dengan 7 MPa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Uji DWT akan dikalibrasi sampai dengan rentang 1750 kPa sesuai dengan kapasitas DWT standar, hal ini dilakukan untuk tujuan yang lebih jauh yaitu membangun rantai ketertelusuran mandiri dari DWT pnumatik primer pada rentang tekanan 350 kPa yang memiliki diameter yang 35 mm, yang sudah terlebih dahulu direalisasikan secara dimensional (Samodro, Ega, & Hafid,

2015) sampai dengan rentang tekanan 500 MPa dari DWT Hidraulik.

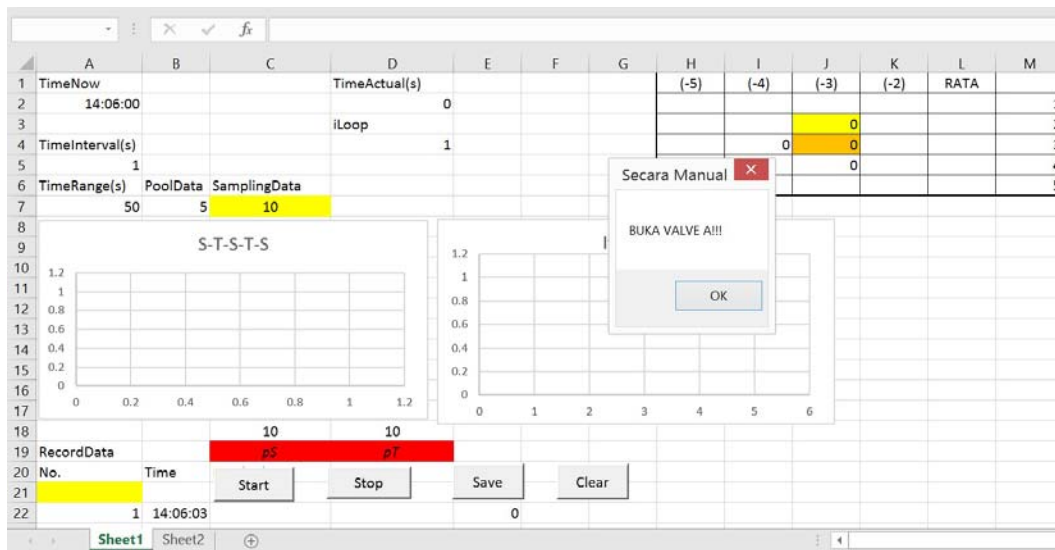


Gambar 4 *Set up* kalibrasi DWT dengan metode TAC semi-otomatis.

DWT yang dikomparasikan memiliki rasio luasan *Piston-Cylinder Assembly* (PCA) 1:4 atau tidak identik. Hal ini sengaja dilakukan, untuk mempertajam analisa pengukuran dengan membandingkan hasil kalibrasi menggunakan metode yang dikembangkan terhadap hasil kalibrasi dengan metode umum, khususnya terkait tingkat kesulitan pengambilan datanya karena perbedaan sensitivitas piston terhadap massa tambahan yang disebabkan perbedaan rasio PCA.

b. Perangkat lunak

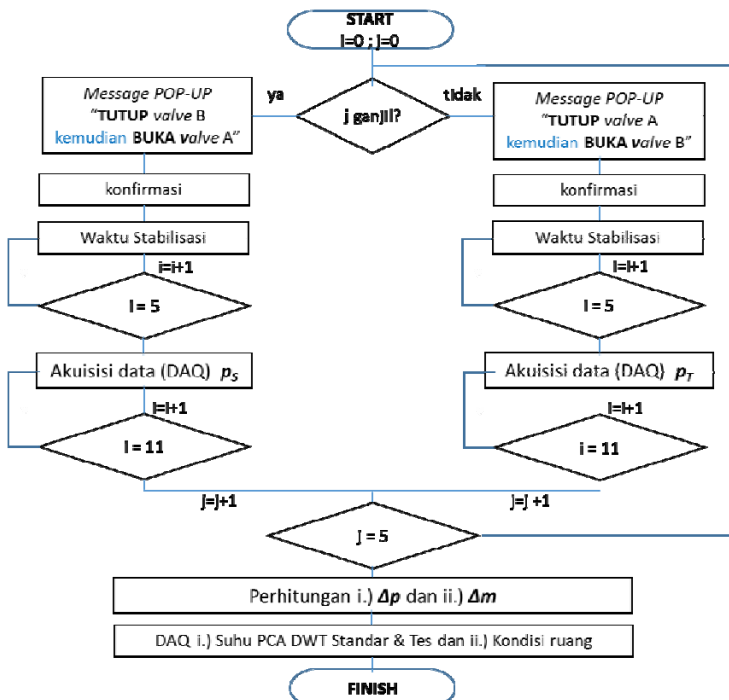
Perangkat lunak yang dikembangkan untuk mendukung implementasi metode TAC semi-otomatis ini adalah hasil modifikasi dari perangkat lunak yang digunakan pada metode TAC *full-otomatis* pada sistem kalibrasi DWT hidraulik. Keduanya dibuat berbasis VBA pada excel seperti pada Gambar 5, karena dipastikan semua laboratorium kalibrasi sudah memiliki excel, sehingga tidak perlu mengadakan perangkat lunak khusus berbayar lainnya. Hal yang berbeda adalah tidak adanya komunikasi VBA excel ini dengan mikrokontroler yang digunakan untuk mengoperasikan *valve* secara otomatis, melainkan dengan menampilkan *pop-up message* yang memberikan panduan pada operator untuk mengoperasikan *valve* secara manual pada waktu tertentu.



Gambar 5 Tampilan antar muka perangkat lunak berbasis VBA pada metode semi-otomatis TAC yang dibuat.

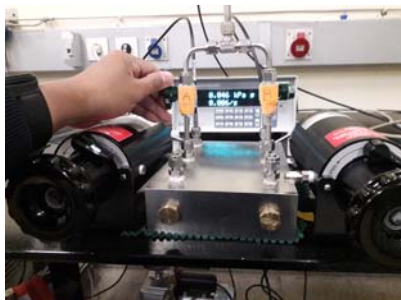
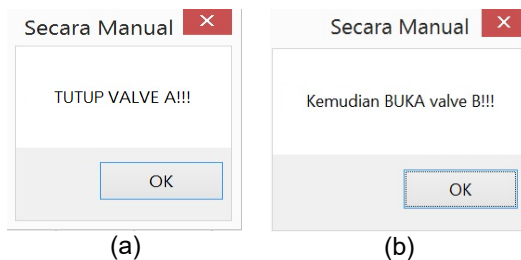
Gambar 6 merupakan diagram alir dari metode TAC semi-otomatis yang dikembangkan. Proses penentuan kesetimbangan tekanan, diawali dengan tombol mulai (START) yang akan menjalankan loop pengukuran (j) berdasarkan waktu. Dibutuhkan 5 pengukuran j untuk mendapatkan konfigurasi S-T-S-T-S. Masing-masing pembacaan tekanan p_s ataupun p_T

diulang sebanyak 6 kali ($i = 6$). Waktu stabilisasi sebelum dilakukan akuisisi data adalah 30 detik ($5i$). Interval tiap loop ($\Delta i = \Delta j$) adalah 6 detik dengan mempertimbangkan kecepatan minimum komunikasi data antara PC dan *Transducer* (DH Instruments, 2004).



Gambar 6 Diagram alir perangkat lunak yang digunakan pada metode semi-otomatis TAC yang dibuat.

Sebelum melakukan akuisisi data p_s , tekanan DWT standar perlu dihubungkan ke *transducer* dengan cara menutup *valve* B dan kemudian membuka *valve* A, dan sebaliknya saat melakukan akuisisi data p_T . Pengoperasian dari kedua *valve* tersebut mengikuti panduan dari perangkat lunak yang akan menampilkan *pop-up message* (Gambar 7) untuk membuka atau menutup *valve* tertentu, dan proses akuisisi data tidak bisa berjalan tanpa melakukan konfirmasi dengan cara menutup pesan tersebut. Interval waktu antara pengoperasian *valve* A untuk menghubungkan *transducer* ke DWT Standar dan *valve* B untuk menghubungkan *transducer* ke DWT Tes dibuat konsisten sekitar 66 detik (11*i*), yaitu waktu yang dibutuhkan untuk stabilisasi dan 6 kali pengambilan data *i*.



(c)
Gambar 7 VBA *pop-up message* .

Pop up message yang akan ditampilkan untuk memberikan aba-aba pengoperasian *ball-valve* (a) untuk menutup *valve* A; (b) untuk membuka *valve* B untuk akuisisi data p_s ; (c) ilustrasi operator mengoperasikan *valve* sesuai dengan panduan yang muncul.

Setelah proses pengulangan *i* dan *j* terpenuhi maka perbedaan tekanan dari DWT standar dan DWT tes (Δp) akan digunakan untuk mengestimasi massa penyetimbang (m_b) yang dibutuhkan. Proses pengukuran diakhiri dengan akuisisi data kondisi ruangan dan suhu piston dari masing-masing DWT.

Pada antar-muka perangkat lunak disediakan juga beberapa tombol lain, yaitu tombol *STOP* yang digunakan untuk melakukan interupsi pengambilan data apabila terjadi kesalahan komunikasi PC dengan kedua DWT maupun *transducer*. Selain itu terdapat tombol *SAVE* untuk menyimpan data yang sudah diperoleh pada *excel sheet* yang telah dipersiapkan. Terakhir adalah tombol *CLEAR* untuk membersihkan data *sheets* untuk proses akuisisi data selanjutnya.

c. Pengambilan Data Kalibrasi dan Verifikasi

Pengambilan data dilakukan pada 11 titik komparasi, yaitu: 10 titik dengan *pressure-step* 150 kPa, dari 355 kPa sampai dengan 1750 kPa dan ditambah 1 titik tekanan minimum yang mampu dihasilkan DWT yaitu 200 kPa. Dilakukan 2 seri pengukuran tekanan naik dan 1 seri pengukuran tekanan turun, sesuai prosedur I.MM.3.03 Laboratorium Tekanan Puslit Metrologi LIPI yang mengacu pada EURAMET cg-3, untuk kalibrasi *Pressure Balance*. (Puslit Metrologi LIPI, 2014)

Perbedaan tekanan Δp dari DWT standar dan DWT tes yang diperoleh dari selisih pembacaan *transducer*, dikonversi menjadi massa penyetimbang (m_b) dengan mengalikan *pressure factor* (f_p) dari DWT, sesuai dengan persamaan 8 - 9 berikut;

$$\Delta p = p_T - p_s \quad \dots (8)$$

$$\Delta m_b = \Delta p \cdot f_p \quad \dots (9)$$

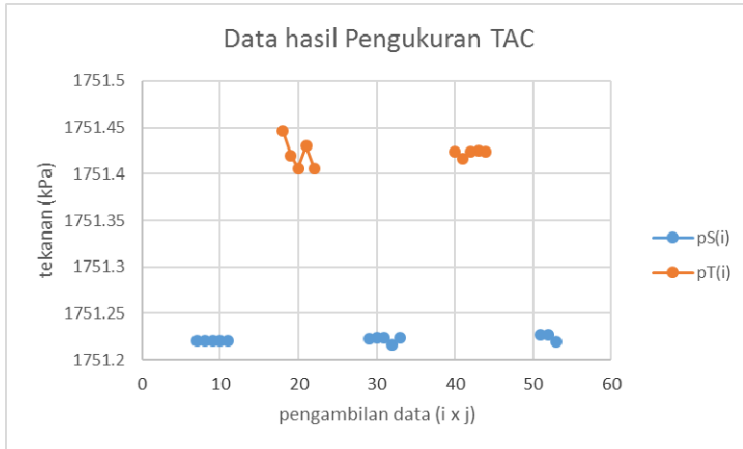
f_p merupakan sensitifitas perubahan pembacaan *transducer* terhadap perubahan massa tambahan pada masing-masing DWT yang diperoleh dari hasil kalibrasi *transducer*.

Sesuai dengan persamaan 8, Δp bisa bernilai positif maupun negatif, dan hal ini menentukan dimana m_b akan diletakkan. Jika Δp bernilai positif, artinya p_T lebih besar dari p_s , maka m_b perlu ditambahkan pada DWT Standar, dan begitu juga sebaliknya. Pada penelitian ini digunakan nilai *pressure factor* untuk DWT Standar (f_{pS}) dan *pressure factor* untuk DWT Tes (f_{pT}) secara berturut-turut sebesar 20 g/kPa dan 5 g/kPa.

Dari hasil kalibrasi diperoleh hubungan antara efektif area pada suhu acuan dan tekanan kalibrasi ($A_{p,20}$) terhadap beberapa titik tekanan observasi. Parameter DWT Tes berupa nilai luasan efektif piston-silinder pada suhu acuan dan tekanan nol gauge ($A_{0,20}$) dan

koefisien distorsi (λ) dapat diperoleh dengan menggunakan analisa regresi linier menurut Persamaan 4.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 8 Grafik data hasil pengukuran metode TAC semi-otomatis pada tekanan nominal 1750 kPa.

Gambar 8 memperlihatkan contoh data hasil pengukuran dengan metode TAC pada tekanan komparasi nominal 1750 kPa. Dapat dilihat bahwa tekanan DWT standar yang terbaca oleh *transducer* (p_s) lebih rendah dari

pada tekanan DWT tes (DWT yang dikalibrasi) yang terbaca oleh *transducer* (p_T).

Tabel 1 Hasil data akusisi *transducer*, suhu piston DWT dan kondisi ruangan, sekaligus estimasi massa penyetimbang.

WU_UP_100% + 0 (STD) + 78 (UUT)				
Δm	Δp	Σ	pS, pT	j
		0 kPa	1751,22 kPa	1
-0,19955 kPa	-0,2005 kPa	0,01699412 kPa	1751,422 kPa	2
		0,00349285 kPa	1751,222 kPa	3
STD + 3,99 g	-0,1986 kPa	0,00371484 kPa	1751,423 kPa	4
		0,00383406 kPa	1751,226 kPa	5
Suhu DWT		Kondisi Ruangan		
20 °C	19,93 °C	19,49 °C	53 %	100,329 kPa
T_std (°C)	T_test (°C)	T_amb (°C)	RH (%)	P_amb (kPa)

Tabel 1 mentabulasikan data dari masing masing nilai rata-rata dan stabilitas pembacaan tekanan yang ditunjukkan dalam nilai standar deviasi (σ) dari p_s dan p_T . Dapat dilihat bahwa tekanan DWT standar relatif lebih stabil dari pada DWT tes, dan tekanan DWT tes pada pengambilan pertama memiliki σ yang paling besar. Karakteristik ini sangatlah normal karena diameter piston-silinder DWT standar yang memiliki ukuran relatif lebih besar hanya sedikit terpengaruh oleh kompresibilitas gas yang digunakan.

Selain itu, Tabel 1 juga menampilkan perbedaan nilai pembacaan tekanan dari kedua DWT yang dikomparasi (Δp) yang dihitung berdasarkan Persamaan 8 sebesar -0,19955 kPa (ditandai dengan elips bergaris putus-putus).

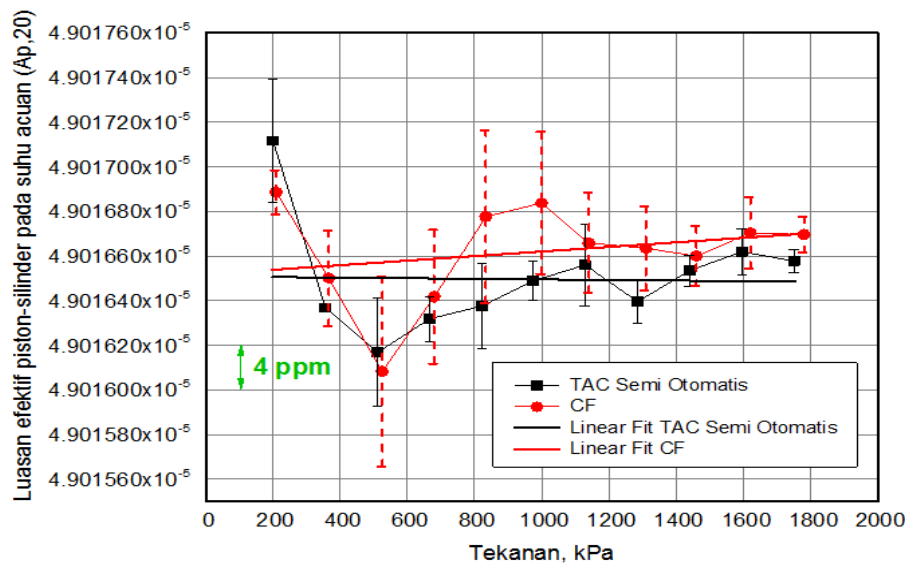
Hasil estimasi massa penyetimbang (m_b) sebagai konversi dari Δp berdasarkan Persamaan 9 sebesar 3,99 g yang harus diletakkan pada DWT standar (ditunjukkan dengan elips bergaris tegas). Parameter lain yang mempengaruhi perhitungan tekanan, seperti suhu piston-silinder dari kedua DWT, dan

kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan dan tekanan ruangan, juga di rekam pada Tabel 1.

Hasil kalibrasi menunjukkan bahwa pengulangan dari nilai m_b yang diperoleh dengan metode TAC semi-otomatis ini relatif

kecil, ditunjukkan dengan nilai σ maksimum sebesar 96 mg pada tekanan 1750 kPa. Sedangkan dengan menggunakan metode *crossfloat* umum nilai σ maksimumnya lebih besar yaitu 430 mg pada tekanan 200 kPa.

Perbandingan Luasan Efektif Piston-Silinder pada Suhu 20 °C untuk Tiap Titik Tekanan



Gambar 9. Perbandingan konsistensi hasil dari 3 pengulangan.

Gambar 9, menunjukkan konsistensi hasil pengukuran dari kedua metode pada 11 titik komparasi tekanan dari 2 pengukuran dalam keadaan tekanan naik dan 1 pengukuran dalam keadaan tekanan turun berdasarkan nilai σ dari

luas efektif pada tiap titik tekanan komparasi ($A_{p,20}$). Dapat dilihat bahwa secara umum perbedaan nilai $A_{p,20}$ dari kedua metode masih tercakup rentang ketidakpastian tipe-Any.

Tabel 2. Perbandingan hasil kalibrasi DWT dengan metode TAC semi-otomatis metode *crossfloat*.

Parameter	TAC Method Semi-Automated		Crossfloat Method	
	Value	Uncertainty	Value	Uncertainty
$A_0(m^2)$	$4,901\ 65 \times 10^{-5}$	$6,0 \times 10^{-9}$	$4,901\ 65 \times 10^{-5}$	$6,7 \times 10^{-9}$
$b(Pa^{-1})$	$-0,3 \times 10^{-12}$	$3,9 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-12}$	$4,4 \times 10^{-12}$

Tabel 2, menunjukkan ekuivalensi hasil kalibrasi yang dilakukan dengan metode TAC semi-otomatis dan metode *crossfloat* umum, berdasarkan parameter luas efektif pada tekanan nol gauge dan suhu acuan ($A_{0,20}$) dan koefisien distorsi (λ). Dapat dilihat bahwa perbedaan relatif nilai $A_{0,20}$ sebesar $< 1 \times 10^{-6}$, jauh lebih kecil dari pada nilai ketidakpastian bentangan relatifnya yaitu sebesar 14×10^{-5} . Sehingga apabila dihitung nilai En-nya sekitar -0,001. Sedangkan selisih dari nilai λ sebesar 2,4

$\times 10^{-12} Pa^{-1}$ yang masih tercakup pada rentang ketidakpastian bentangannya yaitu sebesar $4,4 \times 10^{-12} Pa^{-1}$.

Pada penelitian ini belum diobservasi pengaruh *delay* pengoperasian (pembukaan atau penutupan) *valve* yang disebabkan oleh respon operator, karena hal ini dapat mempengaruhi waktu keseluruhan *loop* atau minimal mempengaruhi kestabilan pembacaan *transducer* jangka pendek.

Efisiensi dan efektifitasnya diuji dengan pengambilan data yang dilakukan oleh operator yang belum pernah mengambil data kalibrasi DWT pneumatik sebelumnya, dan kali ini melakukannya hanya dengan mengikuti panduan berbentuk *pop-up message* untuk mengoperasikan (membuka atau menutup) *ball-valve*, melalui perangkat lunak berbasis VBA yang dikembangkan.

Dengan metode ini, waktu yang dibutuhkan menjadi relatif lebih singkat dan konsisten, yaitu rata-rata setengah dari waktu yang dibutuhkan pada metode *crossfloat* umum.

5. KESIMPULAN

Metode kalibrasi *Transducer Assisted Crossfloat* (TAC) semi-otomatis pada kalibrasi DWT pneumatik berhasil dibangun, dengan menambahkan *pressure transducer* yang memiliki akurasi tinggi dan mengembangkan program data akuisi berbasis VBA.

Hasil pengukuran berulang dari metode TAC semi-otomatis yang ditampilkan dalam nilai standar deviasi (σ) relatif lebih kecil dari pada yang diperoleh melalui metode *crossfloat*. Lebih jauh lagi, parameter hasil kalibrasi metode TAC semi-otomatis yang berupa luasan efektif pada tekanan nol gauge dan suhu acuan ($A_{0,20}$) memiliki perbedaan relatif sebesar $< 1 \times 10^{-6}$, sedangkan ketidakpastian relatifnya berada dalam orde 100 kali lebih besar. Hal ini menunjukkan ekuivalensi yang tinggi terhadap hasil kalibrasi yang dilakukan dengan metode *crossfloat* yang lebih umum digunakan karena keakuratannya, dengan $En = -0,001$. Sedangkan selisih dari nilai koefisien distorsi (λ) sebesar $2,4 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ masih tercakup pada rentang ketidakpastiannya yaitu $4,4 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$.

Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh ketidakkonsistenan operator dalam mengoperasikan *valve* atau *delay* akibat respon operator khususnya terhadap stabilitas pembacaan tekanan oleh *transducer* maupun hasil pengukuran secara keseluruhan.

Metode *transducer assisted crossfloat* (TAC) semi-otomatis sederhana yang dikembangkan ini sangat mungkin diadopsi oleh laboratorium kalibrasi untuk melakukan kalibrasi DWT.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar besarnya terhadap manajemen Puslit Metrologi

LIPI yang telah memfasilitasi penelitian ini dan juga atas kerjasama rekan rekan teknisi litkayasa dan peneliti Laboratorium Tekanan yang telah membantu dalam pengambilan data dan memberikan masukan positif bagi karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Choi, I. M., Yang, I.S., & Woo, S.Y.(2013). *High dynamic pressure standard based on the density change of the step pressure generator*. Metrologia 50, Institute of Physics Publishing
- Ega, A.V. & Samodro R.R.A. (2014). Pengecekan Antara Pressure Balance Standar Sebagai Implementasi Jaminan Mutu Laboratorium Tekanan Puslit Metrologi LIPI sesuai dengan SNI ISO/IEC 17025:2008. Prosiding PPI Standardisasi 2014 hal. 43-54, Jakarta
- Ega, A.V. & Samodro R.R.A. (2015). Pengaruh Sensitifitas Massa Tambahan Terhadap Balancing Mass Pada Metode Cross Float Pressure Balance. Prosiding PPI-KIM Ke-41 hal. 1-10, Jakarta.
- Ega, A.V. & Samodro R.R.A. (2017). *TAC Method to Overcome the Practical Difficulty in the Calibration of DWT with Insensitive Piston*. Presented at 1th International Conference on Metrology, Jakarta, Indonesia.
- EURAMET (2011). EURAMET cg-3 version 1.0 (03/2011) *Calibration of Pressure Balances*.
- Fitzgerald, M., Sutton, C., & Jack, D. (2007). *MSL Technical Guide 16 Care and Use of a Deadweight Tester*.
- FLUKE Calibration. (2012). *RPM4 Reference Pressure Monitor Operation and Maintenance Manual*.
- Kobata, T.(2007). *A fully automated calibration system for pressure balance*. IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference Cultivating metrological knowledge, Merida, Mexico, 27th to 30th November, 2007.
- Kobata, T.(2011). *Multiple cross-float system for calibrating pressure balances*, PTB – Mitteilungen Forsehen und Prufen 121, pp. 274-277.
- Kobata, T. & Olson, D.A. (2005). *Accurate Determination of Equilibrium State Between Two Pressure Balance Using a Pressure Transducer*. Metrologia 42, Institute of Physics Publishing

- Kobata, T., Kojima, M., Kajikawa, H., & Iizumi, H. (2017). *Improvement of Reliability in Pressure Measurements Through Effective Use of Digital Pressure Gauges*. presented at APMF 2017 Metrology Moving Towards Foundation, Krabi, Thailand.
- Olson, D.A. & Driver R.G. (2013). *SIM Metrology School : Pressure*, National Institute of Standards and Technology, USA.
- Olson, D.A. & Kobata T. (2002). *Automating the Calibration of Two Piston Gage Pressure Balance*. 2002 NCSL International Workshop and Symposium.
- Puslit Metrologi LIPI. (2014). *I.MM.3.03. Procedure for Pneumatic Pressure Balance Calibration*. Setu, Tangerang Selatan.
- Samodro, R.R.A., Ega, A.V., & Hafid (2015). *Calculation of effective area based on dimensional measurement for 35 mm diameter piston-cylinder unit of KIM-LIPI Pressure Standard*. Poster session at XXI IMEKO World Congress, Prague, Czech Republic
- Samodro, R.R.A. & Ega A.V. (2016). *Study on the implementation of iterative method A-B-A-B-A in the calibration of pressure balances at RCM-LIPI*. presented at 8th Pressure and Vacuum Symposium, Da Nang, Vietnam.

