

## **EVALUASI KINERJA ALAT UKUR TINGGI MUKA AIR OTOMATIS MENGUNAKAN KALIBRATOR DI LABORATORIUM**

### ***EVALUATION OF AUTOMATIC WATER LEVEL METER PERFORMANCE USING CALIBRATOR AT LABORATORY***

**Isnan Fauzan Akrom<sup>1)</sup> Hany Agustiani<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Pusat Litbang Sumber Daya Air  
Jl. Ir H. Juanda No. 193 , Bandung, Indonesia  
E-Mail: [isnanakrom@gmail.com](mailto:isnanakrom@gmail.com)

#### **ABSTRAK**

*Pembangunan infrastruktur Sumber Daya Air (SDA) membutuhkan perencanaan yang matang, salah satunya memerlukan analisis hidrologi. Akurasi data hidrologi dipengaruhi oleh metode, operator/pengamat, serta kinerja alat ukur yang digunakan. Sampai saat ini, instansi pengelola SDA yang ada di Indonesia melakukan pengamatan debit di sungai atau saluran tidak secara langsung, tetapi dengan cara pengamatan Tinggi Muka Air (TMA) pada Pos Duga Air. Nilai TMA dapat dibaca langsung secara manual atau menggunakan alat ukur TMA otomatis (AUTO) yang sudah banyak dijumpai dengan berbagai tipe. Namun apapun tipenya, perlu dilakukan evaluasi kinerjanya, salah satunya melalui proses kalibrasi di laboratorium. Tulisan ini menyajikan evaluasi beberapa jenis AUTO (AWLR, AWLL pelampung, dan AWLL tekanan) menggunakan alat kalibrator di Laboratorium. Dengan membandingkan hasil pembacaan TMA dari AUTO dengan alat standar/acuan menggunakan kalibrator, didapatkan nilai kesalahan pengukuran dan ketidakpastian pengukuran. Berdasarkan hasil ujicoba diketahui bahwa AUTO yang memiliki tingkat akurasi maupun presisi terbaik secara berurutan adalah AWLR, AWLL tekanan, dan AWLL pelampung.*

**Kata Kunci:** AWLR, AWLL, Kalibrator, Kesalahan Pengukuran, Ketidakpastian Pengukuran

#### **ABSTRACT**

*Water resources infrastructure development requires a careful planning, one of which requires hydrological analysis. The accuracy of hydrological data is influenced by the method, operator/observer, and the performance of the measuring instrument. Up date water resources management agencies in Indonesia have conducted observations of discharges in the rivers or channels, by observing Water Level (WL) at the gauging station. WL values can be read directly or by using an automatic WL meter tools (AUTO) which have been finstalled in many gauging stations. Therefore, it is necessary to evaluate the AUTO performance that can be done through calibration in the laboratory. This paper evaluates the performance of several types of AUTO (AWLR, AWLL buoyance, and AWLL pressure) by comparing the measurement results with the standard/reference tool i.e, using a calibrator instrument, so that the values of the measurement error and uncertainty were obtained. Both parameters were used to determine the performance of AUTO devices because they are related to the level of accuracy and precision. Based on the results, it was found that AWLR produces the best level of accuracy and precision, followed by AWLL pressure, and AWLL buoyance.*

**Keywords:** AWLR, AWLL, Calibrator, Measurement Error, Measurement Uncertainty.

## PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur Sumber Daya Air (SDA) membutuhkan perencanaan yang matang, salah satunya memerlukan analisis hidrologi. Agar mendapatkan hasil analisis hidrologi, yang akurat, perlu didukung oleh ketersediaan data yang berkualitas. Data hidrologi yang berkualitas adalah data yang memiliki periode pengamatan yang panjang dan kontinyu (Riady dkk, 2017), sekaligus juga akurat dan tepat waktu (Syofyan, 2016). Akurasi data hidrologi dipengaruhi oleh metode pengukuran, ketelitian operator/pengamat, serta kinerja alat ukur yang digunakan (Dahmen dan Hall, 1990).

Sampai saat ini instansi pengelola SDA yang ada di Indonesia melakukan pengamatan debit di sungai atau saluran tidak secara langsung, tetapi dengan cara pengamatan Tinggi Muka Air (TMA) pada pos duga air. Nilai TMA (m) dikonversi ke nilai debit ( $m^3/s$ ) menggunakan persamaan *rating curve*. Persamaan tersebut diperoleh dari hubungan antara TMA dan pengukuran debit sesuai menggunakan *Current Meter*. TMA dapat dibaca langsung melalui papan duga air (umumnya 3 kali sehari dilakukan oleh pengamat pos duga air) atau dibaca secara otomatis menggunakan alat ukur TMA otomatis (AUTO). Keuntungan menggunakan AUTO adalah dapat diperoleh data TMA dengan resolusi temporal yang tinggi (menitan atau jam-jaman). Hal tersebut sangat dibutuhkan khususnya untuk analisis banjir, karena kenaikan TMA di sungai atau saluran drainase akibat hujan ekstrim dapat berlangsung sangat cepat, dalam hitungan jam atau menit (Mulyanto dkk, 2012). Disamping itu, nilai TMA rata-rata harian yang diperoleh dari pengamatan manual TMA tidak dapat digunakan untuk analisis hidrograf banjir.

Ada berbagai tipe AUTO yang telah digunakan di Indonesia. Berdasarkan teknologi perekaman datanya, terdapat AUTO dengan tipe mekanik/grafik, sering disebut dengan *Automatic Water Level Recorder* (AWLR), dan tipe digital, *Automatic Water Level Logger* (AWLL) (PUSAIR, 2016). Semua tipe AUTO memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sehingga perlu disesuaikan dengan penggunaannya agar didapatkan hasil yang optimal. Namun apapun tipenya, perlu dilakukan evaluasi kinerjanya, melalui uji coba kalibrasi di laboratorium dan lapangan. Kalibrasi di lapangan biasanya dilakukan pada saat pertama kali pemasangan dan tiap beberapa periode tertentu, baik saat operasi rutin (saat penggantian kertas grafik untuk AWLR atau pengambilan data dari memori untuk AWLL), evaluasi berkala, maupun perbaikan. Sebelum direncanakan untuk

dipasang di lapangan, tentu perlu dipastikan bahwa AUTO yang akan digunakan memiliki kinerja yang baik, yaitu memiliki akurasi dan presisi yang sesuai dengan kebutuhan. Untuk mengetahui akurasi dan kepresisian AUTO dapat dilakukan dengan uji coba kalibrasi di Laboratorium menggunakan Kalibrator AUTO.

Puslitbang Sumber Daya Air telah mengembangkan alat Kalibrator AWLR, ditunjukkan pada Gambar 1, yang bisa digunakan juga untuk kalibrasi AWLL dengan sensor tipe pelampung dan *submersible* jenis transduser tekanan atau jenis konduktansi (Ginanjar dkk, 2016). Kalibrator AWLR tersebut berupa 2 tabung berbahan besi ( $\emptyset$  0,4 x 4,1 m), yang menyerupai tabung pipa pada pos duga air otomatis tipe konsol. Kedua tabung tersebut saling terhubung dibagian dasarnya. Pada alat tersebut terdapat pipa akrilik ( $\emptyset$  0,02 x 4,1 m), merupakan bejana berhubungan yang dilengkapi mistar dengan resolusi 1 mm sebagai pembacaan standar atau nilai acuan pada kalibrasi TMA. Simulasi fluktuasi TMA pada tabung menggunakan pompa dengan kapasitas debit 40 lt/menit. Hasil uji coba sebelumnya menunjukkan laju kenaikan TMA maksimum 10 cm dalam 7 detik.

Tulisan ini menyajikan evaluasi beberapa jenis AUTO melalui kalibrasi untuk mendapatkan nilai akurasi dan kepresisiannya. Parameter tersebut biasa digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu alat ukur. Tipe AUTO yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu AWLR dengan sensor tipe pelampung, AWLL dengan sensor tipe pelampung, dan AWLL dengan sensor transduser tekanan. Pemilihan alat yang digunakan menyesuaikan spesifikasi teknis Kalibrator, kemudian jenis alat tersebut banyak digunakan untuk telemetri di Indonesia, khususnya AWLL (Ginting dan Putuhena, 2014).

## KAJIAN PUSTAKA

AWLR menggunakan jam mekanik dengan sistem dial/pegas atau jam elektronik untuk memutar drum tempat pemasangan kertas grafik, sehingga drum berputar sekali putaran (periode penggantian kertas grafik) dalam satu hari atau minggu. Perubahan muka air akan menggerakkan pelampung sehingga pada saat muka air naik, pelampung naik dan pemberat turun, begitu juga sebaliknya. Pelampung dan pemberat tersebut dihubungkan oleh tali yang mengikat suatu roda gigi, sehingga dapat memutar menggerakkan tangkai pena. Hidrograf tergambar pada kertas grafik akibat tangkai pena yang bergerak sesuai dengan perubahan TMA. AWLL ada yang juga

menggunakan sensor pelampung dengan prinsip yang hampir sama dengan AWLR. Bedanya, roda gigi yang berputar akibat gerakan pelampung dan pemberat, menggerakkan sistem *incremental rotary encoder*, yang berfungsi merubah putaran roda menjadi pulsa listrik. Semakin banyak roda berputar (akibat TMA berubah) semakin banyak

pulsa listrik, yang kemudian dibaca oleh *Logger* (sistem pengolah data digital). *Logger* berfungsi untuk membaca data dari sensor, mengolah data sederhana, menyimpan data kedalam suatu memori, menampilkan data, dan mengirim data menggunakan tambahan perangkat komunikasi (WMO, 2010).



(a)



(b)



(c)

**Gambar 1** (a) Kalibrator AWLR tampak depan; (b) Penempatan AUTO yang diuji/kalibrasi; (c) Mistar sebagai alat standar/acuan)



(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 2** (a) AWLR; (b) Sensor pelampung pada AWLL; (c) Transduser tekanan pada AWLL; (d) *Logger* AWLL

### Jenis-Jenis AUTO

Berdasarkan teknologi sensor, terdapat AUTO dengan tipe pelampung, konduktansi, transduser tekanan, ultrasonik, dan lain-lain. AWLL dapat dipadukan dengan semua tipe sensor diatas, sedangkan AWLR biasanya hanya

menggunakan sensor tipe pelampung. Sensor muka air tipe konduktansi adalah yang paling sederhana. Dengan memanfaatkan sifat air yang dapat berfungsi sebagai konduktor, ujung detektor akan mengalirkan arus listrik jika menyentuh muka air (Roy dkk, 2016). Tentu tipe ini tidak praktis untuk keperluan hidrologi dalam

monitoring data muka air sungai atau saluran, karena dibutuhkan banyak kabel apabila diharapkan data muka air dengan resolusi yang sama dengan papan duga air. Sensor muka air tipe ultrasonik memancarkan gelombang akustik ultrasonik yang akan memantul kembali apabila mengenai benda, termasuk juga air. Makin jauh jarak ujung sensor dengan muka air (TMA rendah), maka makin besar waktu yang dibutuhkan gelombang ultrasonik memantul kembali untuk dibaca oleh sensor, dan berlaku sebaliknya. Selisih waktu antara pemancaran dan penerimaan gelombang ultrasonik tersebut diterjemahkan menjadi data TMA (Tekle, 2014). AWLL dengan tipe sensor ini tidak dapat dikalibrasi menggunakan Kalibrator pada kajian ini, dikarenakan gelombang ultrasonik dipancarkan dengan sudut tertentu, dapat mengenai tabung bejana (*stilling well*) pada Kalibrator, yang hanya berdiameter 40 cm. Selain tipe pelampung, pada kajian ini juga menggunakan sensor muka air tipe transduser tekanan. Sensor menggunakan prinsip hidrostatis dimana tekanan yang diterima oleh *probe* (ujung sensor yang sensitif terhadap tekanan) sebanding dengan kedalaman air. Komponen elektronik pada sensor mengubah tekanan yang dibaca menjadi arus atau tegangan listrik (Indarto dkk, 2015).

### Prinsip kalibrasi

Pengertian kalibrasi alat ukur menurut ISO/IEC Guide 17025:2005 dan *Vocabulary of International Metrology* (VIM) adalah serangkaian kegiatan yang membentuk hubungan antara nilai yang ditunjukkan oleh instrumen ukur atau sistem pengukuran, atau nilai yang diwakili oleh bahan ukur, dengan nilai-nilai yang sudah diketahui yang berkaitan dari besaran yang diukur dalam kondisi tertentu. Perbandingan atau hubungan antara obyek ukur dan standar ukur dapat berupa tabel yang menampilkan nilai keduanya atau persamaan matematik hubungan antara keduanya.

Tujuan utama kalibrasi adalah untuk mencapai ketertelusuran pengukuran, sehingga dapat diketahui seberapa jauh perbedaan (penyimpangan) antara nilai benar yang tertelusur dengan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur. Data hasil kalibrasi juga dapat dijadikan sebagai parameter untuk menentukan kinerja atau performansi alat ukur, yang tentunya dalam hal ini tergantung pengguna sendiri yang memutuskan nilai toleransi atau batasan untuk beberapa data hasil kalibrasi (misal, nilai koreksi atau kesalahan dan nilai ketidakpastian pengukuran) dari alat ukur yang digunakan.

### METODOLOGI

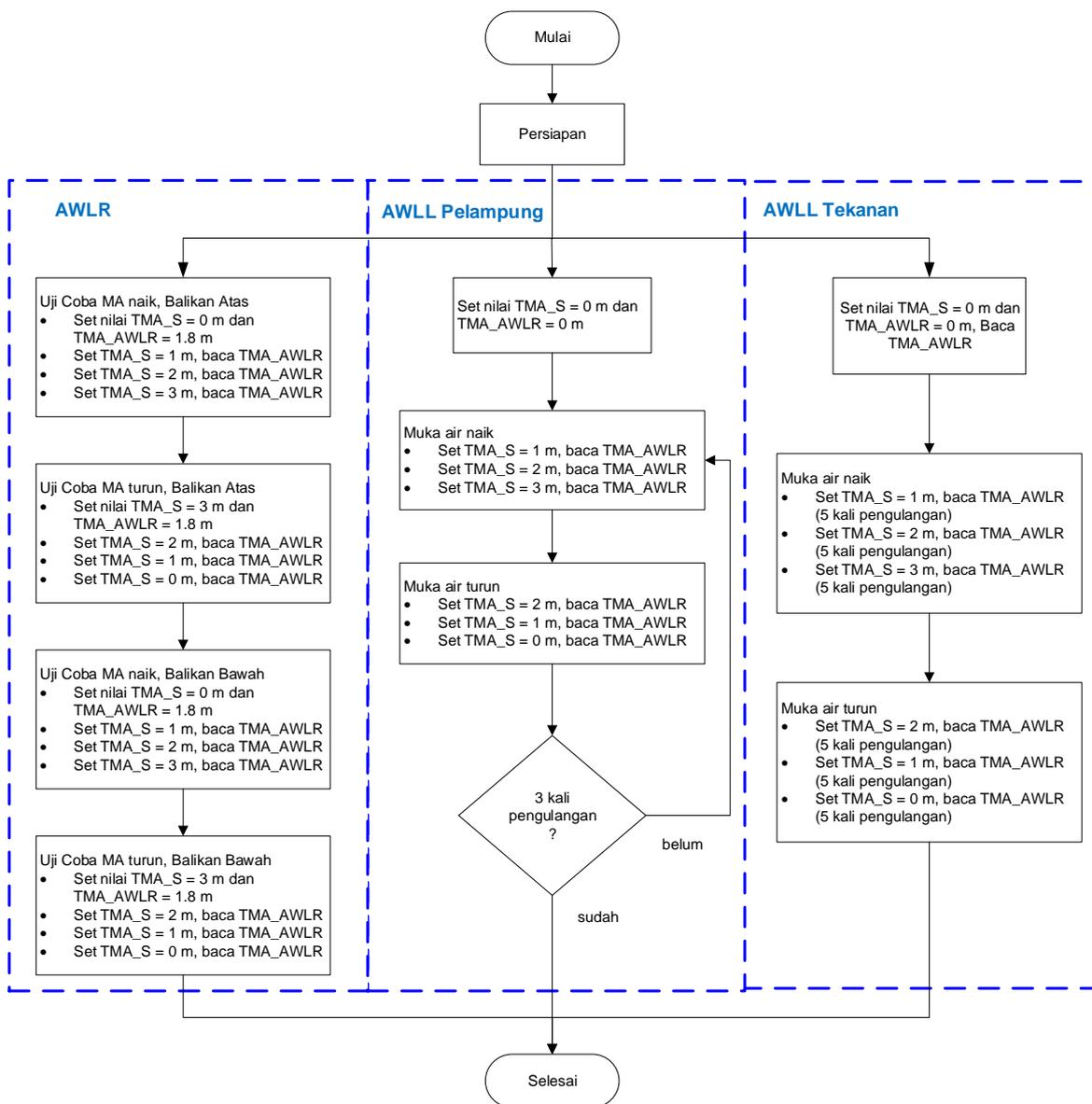
Evaluasi kinerja AUTO dilakukan dengan kalibrasi, yang mencakup perbandingan antara penunjukan AUTO dan alat standar (mistar), sehingga dapat diketahui tingkat akurasi. Didalam rangkaian kegiatan kalibrasi juga termasuk analisis ketidakpastian pengukuran untuk mengetahui kepresisian alat. Alur evaluasi kinerja AUTO menggunakan Kalibrator, ditunjukkan pada Gambar 3, dimulai dengan persiapan bahwa alat yang akan digunakan berfungsi dengan baik. Pada AWLR diperiksa tinta pada tangkai pena pencatat grafik, pemeriksaan balikan grafik, pemeriksaan pelampung dan lain-lain. Persiapan pada AWLL dilakukan dengan mengkonfigurasi parameter pada *Logger* sesuai dengan manual, pemeriksaan kondisi sensor, dan lain-lain.

Uji coba pada berbagai alat ukur biasanya dilakukan pembacaan atau pengukuran beberapa kali atau biasa disebut dengan pengulangan (*repeatability*). Hal tersebut dilakukan untuk memperbesar tingkat kepercayaan. Pada Gambar 3 terlihat bahwa detail tahapan pada alur evaluasi kinerja berbeda untuk masing-masing jenis alat. Hal tersebut disesuaikan dengan prinsip kerja masing-masing alat, yang dijelaskan sebagai berikut:

- 1 AWLR memiliki grafik yang akan tergambar membalik apabila TMA melebihi batas grafik (0 atau 2,5 m), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem pembalik pada AWLR perlu diuji (PUSAIR, 2015), sehingga pada kalibrasi AWLR, dengan memanfaatkan TMA naik atau turun (0 – 3 m), dilakukan beberapa pengulangan proses membalik baik balikan atas (2,5 m) atau balikan bawah (0 m). Oleh karena itu, proses kalibrasi dilakukan sedemikian hingga seperti pada Gambar 3.
- 2 AWLL pelampung tidak memiliki variasi pembacaan saat pengukuran TMA sesaat. Nilai yang tertampil pada *Logger* cenderung tetap apabila tidak ada fluktuasi TMA. Demikian halnya AWLR yang memiliki sensor pelampung mirip dengan AWLL. Grafik TMA tidak akan berubah apabila tidak ada perubahan TMA. Untuk mendapatkan pengulangan pada AWLR/AWLL tipe pelampung, maka diperlukan pengulangan perubahan TMA pada Kalibrator.
- 3 AWLL tekanan sudah memiliki variasi pembacaan saat pengukuran TMA sesaat, sehingga tidak memerlukan banyak variasi TMA pada Kalibrator untuk mendapatkan Pengulangan. Pada tampilan *Logger* terlihat nilai TMA berubah setiap 2 - 3 detik sekali

meskipun tidak ada fluktuasi TMA. Besarnya variasi tergantung dengan kualitas sensor dan *Logger*. Selain itu, program yang

ditanamkan pada *Logger* untuk *updating* data juga berpengaruh terhadap variasi hasil pembacaan.



Gambar 3 Alur Evaluasi Kinerja AUTO menggunakan Kalibrator

Nilai kesalahan ( $E$ ) dari Alat/AUTO yang dikalibrasi pada persamaan (1) adalah penyimpangan atau selisih antara pembacaan alat ( $P_a$ ) terhadap nilai standar ( $N_s$ ). Nilai  $E$  dapat dijadikan parameter untuk melihat tingkat akurasi suatu alat. Nilai standar merupakan penunjukkan alat standar ( $P_s$ ), dalam hal ini adalah selisih nilai TMA penunjukan mistar yang terkalibrasi/tertelusur ke laboratorium alat ukur dimensi dengan koreksi tertentu ( $K_s$ ), terhadap TMA\_0 (acuan TMA 0 cm). Pembacaan alat ( $P_a$ ) adalah selisih antara Penunjukan TMA pada alat terhadap nilai TMA\_0. Pada kajian ini nilai TMA\_0

dari alat dan standar disetel sama saat inialisasi masing-masing pengujian. Pada saat awal TMA penunjukan alat standar ( $P_s$ ) disetel 0 cm, kemudian penunjukan AUTO ( $P_a$ ) juga disetel 0 cm. Khusus untuk AWLL tekanan, akibat nilai  $P_a$  yang terus berubah-ubah, maka meskipun telah disetel agar nilainya 0 cm, hasilnya tetap tidak bisa tepat sama dengan 0 cm. Nilai TMA\_0 pembacaan AWLL tekanan didapatkan dengan cara menghitung rata-rata pembacaan alat dari beberapa pengulangan.

$$E = P_a - N_s = (P_s + K_s) - P_a \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- $E$  : Nilai kesalahan alat (cm)
- $P_a$  : Pembacaan Alat (cm)
- $N_s$  : Nilai standar (cm)
- $P_s$  : Pembacaan standar (cm)
- $K_s$  : Koreksi alat standar (cm)

Tingkat kepresisian dari suatu alat dapat dilihat dari nilai ketidakpastian pengukurannya. Terdapat metode estimasi ketidakpastian pengukuran (JCGM, 2008) yang sudah banyak digunakan oleh laboratorium kalibrasi dan pengujian di seluruh dunia. Metode tersebut diinisialisasi pembuatannya pada tahun 1993 (ISO/IEC Guide 98:1993), dikoreksi dan diterbitkan lagi tahun 1995, hingga menjadi versi terbarunya pada tahun 2008. Metode tersebut juga telah banyak digunakan oleh berbagai bidang metrologi/pengukuran, termasuk yang berkaitan dengan hidrologi yaitu hidrometri. Estimasi nilai ketidakpastian pada pengukuran debit menggunakan metode yang sama telah dilakukan oleh Coz dkk (2012), yang kemudian dikembangkan oleh Despax dkk (2016). Gilmore dkk (2013) menggunakan juga metode tersebut untuk mengukur sumber dan besarnya kesalahan pada alat ukur TMA berbasis citra digital.

Ketidakpastian total dari suatu pengukuran dipengaruhi oleh beberapa faktor/komponen yang menjadi sumber ketidakpastian. Masing-masing komponen perlu diestimasi nilai rentang paruh/*semi range*, yang merupakan suatu batas kemungkinan nilai benar berada, ditunjukkan pada Gambar 4. Pada kajian ini komponen ketidakpastian yang berpengaruh adalah *Repeatability*/Pengulangan, *Readability*/Daya Baca AUTO, *Readability*/Daya Baca alat standar (mistar), *Drift* (perubahan nilai) alat standar. Ketidakpastian dari alat standar (diperoleh dari hasil kalibrasi mistar). Pada kajian ini menggunakan tingkat kepercayaan/*confidence level* ( $CL = 95\%$ ) dengan faktor cakupan ( $k = 2$ ), yang umum dipakai oleh laboratorium kalibrasi di Indonesia. Perhitungan ketidakpastian alat (AUTO) pada kajian ini menggunakan Persamaan (2) dan (3).

$$U = k \cdot u_{gab} \dots\dots\dots(2)$$

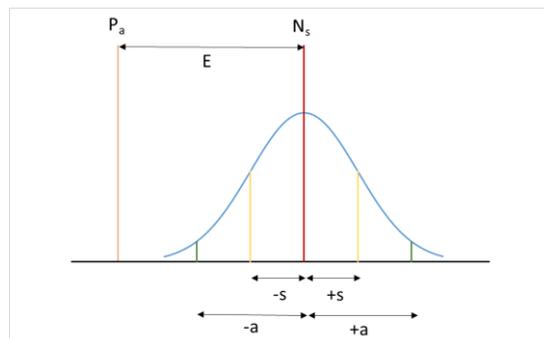
$$u_{gab}^2 = u_p^2 + u_s^2 + u_{ra}^2 + u_{rs}^2 + u_d^2$$

$$= \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{u_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{ra}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{rs}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{MPE}{10\sqrt{3}}\right)^2 \dots\dots(3)$$

dimana :

- $U$  : Ketidakpastian terentang/total suatu alat pada alat AUTO (cm)
- $k$  : Faktor cakupan pada  $CL = 95\%$

- $u_{gab}$  : Ketidakpastian baku gabungan dari semua komponen (cm)
- $u_p$  : Ketidakpastian baku pengulangan (cm)
- $u_s$  : Ketidakpastian baku alat standar pada alat mistar (cm)
- $u_{ra}$  : Ketidakpastian baku resolusi alat standar pada alat AUTO (cm)
- $u_{rs}$  : Ketidakpastian baku resolusi pada alat Standar mistar (cm)
- $u_d$  : Ketidakpastian baku penyimpangan alat standar pada alat mistar (cm)
- $s$  : Standar deviasi (cm)
- $n$  : Jumlah pengulangan
- $U_s$  : Ketidakpastian alat mistar dari sertifikat hasil kalibrasi (cm)
- $ra$  : Resolusi alat pada alat AUTO (cm)
- $rs$  : Resolusi alat standar pada alat mistar (cm)
- $MPE$  : Kesalahan maksimum yang diizinkan dari alat standar pada mistar (cm)

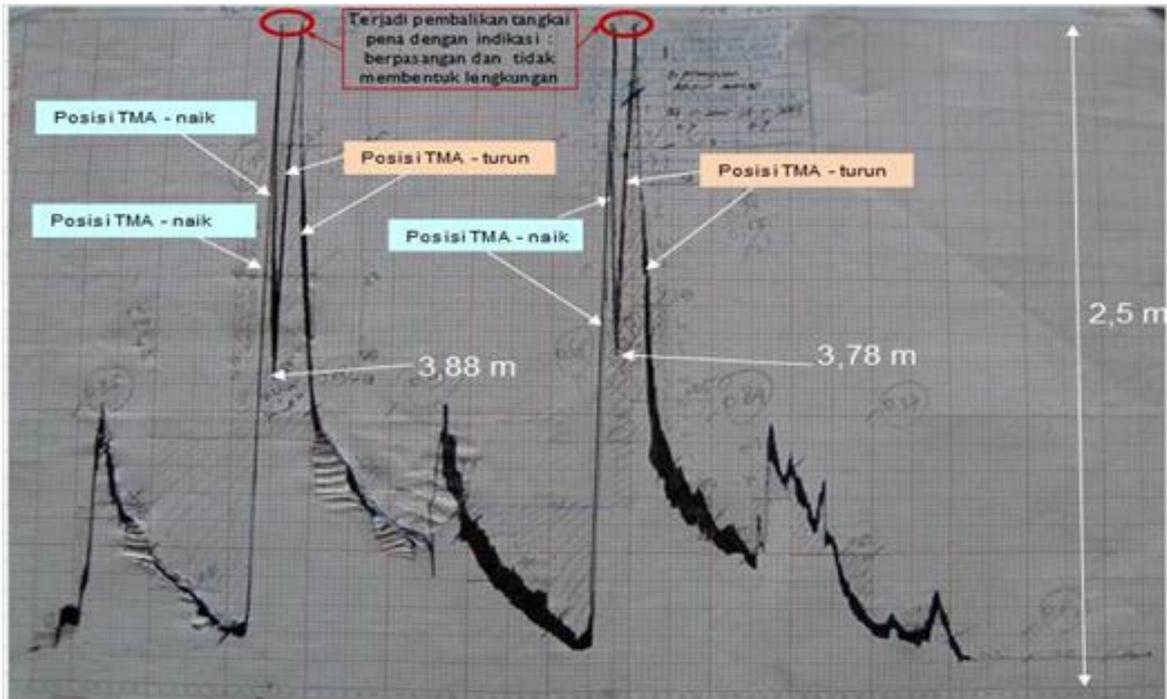


**Gambar 4** Ilustrasi nilai pembacaan alat ( $P_a$ ), nilai standar ( $N_s$ ), kesalahan ( $E$ ), rentang paruh ( $a$ ), dan ketidakpastian baku ( $u$ ), dimana  $u = s$  (standar deviasi) dan  $a = 2s$  pada distribusi normal

Pengukuran menggunakan suatu alat biasanya dilakukan pengulangan beberapa kali untuk meningkatkan tingkat kepercayaan. Variasi dari pengulangan tersebut berkontribusi terhadap nilai ketidakpastian pengukuran. Komponen nilai ketidakpastian dari pengulangan ( $u_p$ ) didapatkan dari nilai rentang paruh, yang berupa standar deviasi ( $s$ ), kemudian dibagi dengan akar kuadrat jumlah pengukuran/pembacaan ( $n$ ). Ketidakpastian baku alat standar ( $u_s$ ) merupakan Ketidakpastian terentang dari alat standar ( $U_s$ ), merupakan rentang paruh pada komponen ketidakpastian

ini, dibagi dengan faktor cakupan alat standar ( $k_s = 2$ ). Kedua nilai tersebut tercantum pada sertifikat kalibrasi mistar. Nilai  $U_s$  bervariasi tergantung dari nilai pembacaan mistar. Ketidakpastian baku daya baca dari AUTO ( $u_{ra}$ ) dihitung dari nilai rentang paruh resolusi AUTO, yang diestimasi dari setengah nilai Resolusi (pembacaan terkecil) skala AUTO ( $ra$ ), kemudian dibagi dengan  $\sqrt{3}$  (koefisien pembagi distribusi

persegi). Mirip halnya dengan  $u_{ra}$ , ketidakpastian baku daya baca alat standar ( $u_{rs}$ ), dihitung dari setengah nilai Resolusi (pembacaan terkecil) skala Mistar ( $ra$ ), kemudian dibagi dengan  $\sqrt{3}$ . Ketidakpastian baku Penyimpangan alat standar diestimasi dengan 10% dari MPE (kesalahan maksimum yang diizinkan), kemudian dibagi dengan  $\sqrt{3}$ .



Gambar 5 Pembalikan grafik TMA pada AWLR (PUSAIR, 2016)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Evaluasi Kinerja AWLR

Hasil ujicoba evaluasi kinerja AWLR, sesuai dengan metode pada kajian ini menghasilkan 6 titik uji, yaitu TMA naik sebesar 100, 200, dan 300 cm serta TMA turun sebesar 100, 200, dan 300 cm (Tabel 1). Masing-masing titik uji memiliki 2 kali pengulangan (grafik tergambar membalik pada skala atas dan skala bawah). Pembacaan TMA dari AWLR ( $P_a$ ) pada Tabel 1 telah dikonversi dari skala grafik ke nilai TMA yang mengacu pada TMA\_0 (TMA pada Kalibrator disetel sehingga menunjukkan 0 cm pada mistar). Pada Tabel 1 terlihat bahwa meskipun resolusi AWLR adalah 2 cm, namun ada nilai TMA yang terbaca 101 cm. Hal tersebut karena AWLR merupakan alat ukur dengan skala analog, sehingga saat grafik yang tergambar berada diantara garis skala 100 dan 102 cm, bisa diambil

nilai tengahnya, yaitu 101 cm. Pembagian skala terkecil alat ukur analog dipengaruhi oleh daya baca operator. Nilai  $K_s$  yang merupakan koreksi dari pembacaan mistar, didapatkan dari sertifikat hasil kalibrasi mistar tersebut dari laboratorium kalibrasi alat ukur dimensi yang terakreditasi. Nilai  $N_s$  dan  $E$  dihitung menggunakan Persamaan (1).

Data hasil ujicoba pada Tabel 1 kemudian dihitung rata-rata dan standar deviasinya untuk tiap titik uji. Nilai standar deviasi digunakan untuk menghitung ketidakpastian pengulangan. Bersama dengan komponen ketidakpastian lainnya yang dihitung dengan Persamaan (2) dan (3), didapatkan ketidakpastian AWLR untuk tiap titik uji. Contoh perhitungan ketidakpastian untuk titik uji TMA naik 100 cm disajikan pada Tabel 2, sedangkan rekap hasil semua titik uji disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 1** Hasil Ujicoba Evaluasi Kinerja AWLR

	Alat Standar			AWLR	Kesalahan
	$P_s$	$K_s$	$N_s$	$P_a$	$E$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
TMA naik, grafik membalik pada skala atas	100	-0,1	99,9	99	-0,9
	200	-0,1	199,9	199	-0,9
	300	-0,1	299,9	300	0,1
TMA turun, grafik membalik pada skala atas	200	-0,1	199,9	200	0,1
	100	-0,1	99,9	100	0,1
	0	0	0	0	0
TMA naik, grafik membalik pada skala bawah	100	-0,1	99,9	100	0,1
	200	-0,1	199,9	200	0,1
	300	-0,1	299,9	300	0,1
TMA turun, grafik membalik pada skala bawah	200	-0,1	199,9	200	0,1
	100	-0,1	99,9	101	1,1
	0	0	0	0	0

**Tabel 2** Contoh Perhitungan Ketidakpastian untuk Titik Uji TMA Naik 100 cm

No	Komponen Ketidakpastian	Rentang paruh (cm)	Tipe/sebaran	Pembagi	Ketidakpastian baku ( $u$ ) (cm)	$u^2$
1	Alat gtandar	0,095	normal	2,00	0,05	0,00
2	Pengulangan	0,7	Tipe A	1,41	0,50	0,25
3	Resolusi alat yang diuji (AUTO)	1	persegi	1,73	0,58	0,33
4	Resolusi alat standar	0,25	persegi	1,73	0,14	0,02
5	Penyimpangan slat standar	0,005	persegi	1,73	0,00	0,00
Jumlah $\sum u^2$						0,61
Ketidakpastian gabungan ( $u_{gab} = \sqrt{\sum u^2}$ )						0,78
Faktor Cakupan ( $k$ ) pada tingkat kepercayaan 95 %						2
Ketidakpastian Total ( $U = k \times u_{gab}$ (cm))						1,6

**Tabel 3** Rekap Hasil Perhitungan Kesalahan dan Ketidakpastian AWLR

	Alat standar	AWLR	Kesalahan	Standar deviasi	Ketidakpastian total
	$N_s$	$P_a$	$E$	$SD$	$U$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Naik 100	99,9	99,5	-0,4	0,7	1,6
Naik 200	199,9	199,5	-0,4	0,7	1,6
Naik 300	299,9	300,0	0,1	0,0	1,2
Turun 100	199,9	200,0	0,1	0,0	1,2
Turun 200	99,9	100,5	0,6	0,7	1,6
Turun 300	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa terdapat 5 komponen sumber ketidakpastian yang diperhitungkan dalam kajian ini. Nilai ketidakpastian baku ( $u$ ) diperoleh dari estimasi nilai rentang paruh dan jenis distribusinya. Rentang paruh komponen ketidakpastian alat standar adalah nilai ketidakpastian pengukuran pada sertifikat kalibrasi mistar (0,095 cm). Rentang paruh komponen ketidakpastian pengulangan didapatkan dari standar deviasi (0,7 cm pada titik uji naik 100 cm) dan jumlah pengulangan (dua kali untuk tiap titik uji). Resolusi AWLR adalah 2 cm (skala grafik AWLR)

sehingga rentang paruh dari komponen resolusi alat adalah 1 cm. Meskipun resolusi dari mistar adalah 1 mm, namun pada Gambar 1.c terlihat bahwa pada bejana indikator TMA terdapat buih di permukaan air. Hal tersebut menyebabkan kerancuan pembacaan mistar yang diestimasi sekitar  $\pm 0,5$  cm, sehingga rentang paruh dari komponen resolusi standar adalah 0,25 cm. Rentang paruh pada komponen penyimpangan standar diestimasi dari 10% nilai  $MPE$ . Nilai tersebut diperoleh dari nilai ketelitian mistar yang merupakan setengah dari skala terkecilnya (0,5 x 1 mm).

Berdasarkan hasil perhitungan ketidakpastian pengukuran pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa komponen ketidakpastian yang paling dominan adalah Resolusi AWLR (2 cm), dimana nilai tersebut menghasilkan rentang paruh sebesar 1 cm, sehingga ketidakpastian bakunya menjadi sebesar 0,58 cm, sedikit lebih besar dari ketidakpastian baku pengulangan (0,50 cm). Dari kelima komponen ketidakpastian, yang membedakan ketidakpastian total ( $U$ ) tiap titik uji adalah komponen ketidakpastian pengulangan, karena komponen ketidakpastian lainnya memberikan nilai yang sama untuk tiap titik uji. Ketidakpastian pengulangan dipengaruhi oleh standar deviasi ( $SD$ ), oleh sebab itu pada Tabel 3 terlihat bahwa  $U$  untuk masing-masing titik uji hanya berubah saat  $SD$  berubah.

Berdasarkan hasil uji coba pada Tabel 3 tidak terlihat adanya tren besarnya perubahan TMA terhadap besarnya nilai ketidakpastian dan Koreksi. Pada Tabel tersebut terlihat bahwa nilai kesalahan ( $E$ ) cukup kecil untuk semua titik uji, yaitu masih dibawah resolusi AWLR (2 cm), bahkan dibawah resolusi papan duga air (1 cm), sehingga dapat dikatakan bahwa AWLR ini memiliki akurasi yang tinggi. Pada Tabel tersebut juga dapat diketahui bahwa nilai  $SD$  cukup kecil (maksimum 0,7 cm). Ketidakpastian total pada AWLR paling besar hanya sebesar 1,6 cm. Nilai tersebut juga masih dibawah resolusi AWLR (2 cm). Berdasarkan ketidakpastian total AWLR yang kecil, dapat disimpulkan bahwa AUTO jenis AWLR ini sangat stabil atau presisi.

### Evaluasi Kinerja AWLL Tipe Pelampung

Meskipun memiliki fungsi yang sama, yaitu mengukur TMA, namun masing-masing AUTO pada kajian ini memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga ujicoba yang dilakukannya pun

dengan cara yang tidak bisa sama. Hasil evaluasi kinerja AWLL pelampung sesuai dengan metode pada kajian ini menghasilkan 6 titik uji, yaitu TMA naik sebesar 100, 200, dan 300 cm serta TMA turun sebesar 100, 200, dan 300 cm, ditunjukkan pada Tabel 4. Masing-masing titik uji memiliki 3 kali pengulangan. Pada ujicoba pengulangan ke-1 TMA turun terlihat bahwa pembacaan alat standar ( $P_s$ ) tidak sampai kembali ke TMA\_0 (0 cm), namun hanya sampai TMA 10 cm. Hal tersebut dilakukan untuk mengimbangi pembacaan AWLL tekanan ( $P_a$ ), karena AWLL tekanan yang digunakan pada kajian ini tidak dapat membaca TMA negatif. Seperti yang disajikan pada Tabel 4 bahwa saat  $P_s = 10$  cm, nilai  $P_a$  sudah mencapai 6 cm, sehingga apabila  $P_s$  dipaksakan sampai kembali ke nilai 0 cm, maka akan didapatkan  $P_a$  dengan nilai 0 juga, padahal nilai  $P_a = 0$  cm belum tentu benar-benar bernilai 0 cm, namun akibat nilai negatif yang telah dikonversi menjadi 0 cm oleh *Logger* AWLL. Hal yang sama juga dilakukan untuk pengulangan ke-2 dan ke-3.

Tabel 4 menunjukkan bahwa nilai kesalahan makin besar seiring dengan banyaknya pengulangan yang dilakukan. Dari percobaan diketahui bahwa kesalahan nilai TMA memiliki kecenderungan semakin negatif (semakin besar dibawah nilai TMA Standar) saat TMA naik, meskipun tidak linier. Namun, kesalahan cenderung tidak berubah saat TMA turun.

Perhitungan ketidakpastian pengukuran pada ujicoba AWLL pelampung mirip dengan AWLR pada Tabel 2, namun yang membedakan adalah komponen ketidakpastian resolusi AWLL pelampung (1 cm). Nilai tersebut menghasilkan rentang paruh sebesar 0,5 cm dan ketidakpastian bakunya sebesar 0,29 cm. Rekap hasil semua titik uji disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 4** Hasil Ujicoba Evaluasi Kinerja AWLL Pelampung

	Alat standar			AWLL tekanan	Kesalahan
	$P_s$	$K_s$	$N_s$	$P_a$	$E$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Pengulangan ke-1 TMA Naik 0-300 cm	100	-0,1	99,9	98	-1,9
	200	-0,1	199,9	197	-2,9
	300	-0,1	299,9	294	-5,9
Pengulangan ke-1 TMA turun 300-0 cm	200	-0,1	199,9	195	-4,9
	100	-0,1	99,9	96	-3,9
	10	-0,02	9,98	6	-4,0
Pengulangan ke-2 TMA naik 0-300 cm	100	-0,1	99,9	92	-7,9
	200	-0,1	199,9	189	-10,9
	300	-0,1	299,9	289	-10,9

	Alat standar			AWLL tekanan	Kesalahan
	$P_s$	$K_s$	$N_s$	$P_a$	$E$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Pengulangan ke-2 TMA turun 300-0 cm	200	-0,1	199,9	187	-12,9
	100	-0,1	99,9	87	-12,9
	20	-0,04	19,96	7	-13,0
Pengulangan ke-3 TMA naik 0-300 cm	100	-0,1	99,9	86	-13,9
	200	-0,1	199,9	184	-15,9
	300	-0,1	299,9	280	-19,9
Pengulangan ke-3 TMA turun 300-0 cm	200	-0,1	199,9	184	-15,9
	100	-0,1	99,9	86	-13,9
	20	-0,04	19,96	7	-13,0

**Tabel 5** Rekap Hasil Perhitungan Kesalahan dan Ketidakpastian AWLL Pelampung

	Alat standar	AWLL pelampung	Kesalahan	Standar deviasi	Ketidakpastian total
	$N_s$	$P_a$	$E$	$SD$	$U$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Naik 100	99,9	92,0	-7,9	6,0	7,0
Naik 200	199,9	190,0	-9,9	6,6	7,6
Naik 300	299,9	287,7	-12,2	7,1	8,2
Turun 100	199,9	188,7	-11,2	5,7	6,6
Turun 200	99,9	89,7	-10,2	5,5	6,4
Turun 300	16,6	6,7	-10,0	5,2	6,0

Berdasarkan hasil perhitungan kesalahan dan ketidakpastian AWLL pelampung (Tabel 5) terlihat bahwa nilai kesalahan sangat besar, jauh diatas resolusi AWLL (1 cm). Hal tersebut menunjukkan AWLL pelampung yang digunakan pada kajian ini sangat buruk akurasi. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa nilai kesalahan semakin membesar negatif terhadap kenaikan TMA, namun tidak ada tren perubahan kesalahan yang cukup signifikan saat TMA turun. Hal tersebut mengakibatkan nilai TMA pembacaan AWLL pelampung terus menerus menjauhi TMA sebenarnya, seiring dengan makin banyaknya fluktuasi muka air, apabila diterapkan di lapangan. Hasil ujicoba juga menunjukkan bahwa ketidakpastian total ( $U$ ) masing-masing titik uji sangat dipengaruhi oleh standar deviasi ( $SD$ ). Artinya, komponen ketidakpastian pengulangan yang paling berpengaruh. Hal tersebut menunjukkan bahwa kesalahan acak lebih dominan dibandingkan kesalahan sistematis, sehingga dapat disimpulkan AWLL pelampung yang digunakan pada kajian ini memiliki tingkat presisi yang buruk juga. Nilai  $U$  yang lebih tinggi saat TMA naik daripada saat turun serta ada tren terhadap kenaikan TMA juga menunjukkan bahwa variasi makin banyak seiring dengan kenaikan TMA. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh slip antara tali pelampung dengan roda pemutar pada sistem

*encoder* (sensor yang merubah putaran menjadi pulsa listrik yang sebanding dengan perubahan TMA) saat TMA naik.

### Evaluasi Kinerja AWLL Tipe Transduser Tekanan

Uji kinerja AWLL tipe transduser tekanan juga telah dilakukan melalui kalibrasi sesuai dengan Gambar 3. Meskipun menggunakan *Logger* yang sama dengan AWLL pelampung, namun AWLL tekanan menggunakan transduser tekanan yang prinsip kerjanya berbeda dengan sistem *encoder* pada pelampung. AWLL pelampung melakukan *increment* (penambahan cacahan pulsa listrik) sebanding dengan kenaikan TMA dan berlaku sebaliknya saat penurunan TMA. Sekali ada perbedaan antara TMA AWLL dengan TMA sebenarnya maka kesalahan tersebut tetap ada, sampai AWLL di setel ulang. Hal tersebut berbeda dengan transduser tekanan yang merubah tekanan air sesuai dengan kedalaman ujung sensor, menjadi nilai TMA. Artinya sistem pelampung membaca perubahan TMA, sedangkan sistem transduser tekanan membaca TMA sesaat. Oleh karena itu, ujicoba pada AWLL Tekanan tidak memerlukan variasi perubahan TMA. Pengulangan untuk tiap titik uji sudah didapatkan dari nilai TMA pembacaan AWLL tekanan yang berubah-ubah (karakteristik

sensor analog) saat pembacaan TMA sesaat. Maka dari itu, ujicoba AWLL pada kajian ini memiliki 6 titik uji, yaitu TMA naik sebesar 100, 200, dan 300 cm serta TMA turun sebesar 100, 200, dan 300 cm, dengan masing-masing titik uji

memiliki 5 kali pengulangan. Hasil ujicoba ditunjukkan pada Tabel 6, sedangkan rekap perhitungan kesalahan dan ketidakpastian pengukuran disajikan pada Tabel 7.

**Tabel 6** Hasil Ujicoba Evaluasi Kinerja AWLL Tekanan

Alat Standar	Pembacaan ( $P_s$ ) (cm)	TMA Naik 0-300 cm				TMA Turun 300-0 cm		
		TMA_0	100	200	300	200	100	0
	Koreksi ( $K_s$ ) (cm)	0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0
	Nilai Standar ( $N_s$ ) (cm)	0	99,9	199,9	299,9	199,9	99,9	0
AWLL Tekanan (cm) Pengulangan ke-	1	-5	96	201	301	199	99	-4
	2	4	101	202	302	200	98	-7
	3	1	99	201	301	197	92	-5
	4	-1	98	197	302	198	94	-6
	5	4	100	201	300	198	99	-10

Keterangan: posisi ujung sensor terhadap muka air adalah pada kedalaman -20 cm saat TMA\_0

**Tabel 7** Rekap Hasil Perhitungan Kesalahan dan Ketidakpastian AWLL Tekanan

	Alat Standar	AWLL Tekanan	Kesalahan	Standar Deviasi	Ketidakpastian Total
	$N_s$	$P_a$	$E$	$SD$	$U$
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Naik 100	99,9	98,2	-1,7	1,9	1,8
Naik 200	199,9	199,8	-0,1	1,9	1,9
Naik 300	299,9	300,6	0,7	0,8	1,0
Turun 100	199,9	197,8	-2,1	1,1	1,2
Turun 200	99,9	95,8	-4,1	3,2	2,9
Turun 300	0,0	-7,0	-7,0	2,3	2,2

Pembacaan AWLL tekanan ( $P_a$ ) pada Tabel 7 merupakan rata-rata dari 5 pengulangan pembacaan AWLL tekanan setelah dikurangi dengan TMA\_0 pada Tabel 6. Pada saat ujicoba tampilan pada AWLL menunjukkan TMA yang berubah-ubah dalam 1-2 detik, hal tersebut wajar mengingat karakteristik sensor tekanan mengeluarkan sinyal listrik analog, kemudian dibaca oleh *Logger* menggunakan *Analog to Digital Converter* (ADC), yang memang rentan terhadap gangguan (*noise*). Namun yang perlu dikaji disini adalah variasinya yang cukup besar, terlihat pada hasil perhitungan standar deviasi pada tiap titik uji, terutama untuk TMA rendah. Pada Tabel 7 dapat dilihat bahwa nilai kesalahan ( $E$ ) cenderung banyak yang bernilai negatif, sehingga kemungkinan hampir mirip dengan AWLL pelampung, dimana makin banyak fluktuasi muka air, maka akan didapatkan nilai TMA hasil pembacaan alat yang semakin dibawah TMA sebenarnya, meskipun untuk AWLL ini lebih baik. Hal yang menarik dari ujicoba AWLL tekanan ini adalah terlihat adanya tren pada nilai  $E$  terhadap TMA naik maupun turun.

Perhitungan ketidakpastian pengukuran pada ujicoba AWLL tekanan mirip dengan kedua AUTO sebelumnya, yaitu seperti Tabel 2. Mirip

dengan AWLL pelampung, komponen ketidakpastian pengulangan mendominasi nilai ketidakpastian total ( $U$ ), meskipun nilainya masih jauh lebih kecil daripada AWLL pelampung. Dengan melihat nilai  $E$  dan  $U$  pada ujicoba ini, tingkat akurasi dan presisi AWLL tekanan lebih baik daripada AWLL pelampung, namun masih kurang baik dibandingkan dengan AWLR.

## KESIMPULAN

Evaluasi Kinerja ketiga tipe AUTO telah dilakukan dengan menggunakan alat kalibrator di laboratorium. Berdasarkan hasil ujicoba didapatkan bahwa baik tingkat akurasi dan presisi terbaik secara berurutan adalah AWLR, AWLL tekanan, dan AWLL pelampung. AWLL pelampung memiliki kelemahan, yaitu ketika terjadi slip pada tali pelampung, akan menyebabkan kesalahan yang makin membesar seiring dengan banyaknya fluktuasi TMA. AWLL tekanan relatif lebih stabil daripada AWLL pelampung khususnya pada TMA tinggi, karena diduga AWLL tekanan kurang akurat apabila ujung transduser tercelup kedalam air dengan kedalaman rendah. Baik AWLL pelampung maupun tekanan yang digunakan pada kajian ini memiliki kinerja yang kurang memuaskan,

kemungkinan AUTO dengan tipe yang sama tetapi dari manufaktur yang berbeda dapat memiliki kinerja yang lebih bagus.

Selain memperhatikan akurasi dan presisi, instansi pengelola hidrologi agar memperhatikan juga kesesuaian dengan kondisi lapangan dan kegunaan dalam pemilihan AUTO. Meskipun pada kajian ini AWLR memiliki kinerja yang paling baik, namun mengingat perkembangan teknologi digital dalam pengukuran yang pesat saat ini, disarankan untuk menggunakan AWLL karena dapat diintegrasikan ke sistem telemetri, sedangkan AWLL yang paling baik pada studi ini adalah AWLL tekanan.

Peningkatan akurasi data pengukuran TMA dapat dilakukan dengan cara pemantauan dan penyetelan AUTO secara berkala, khususnya setelah terjadi banjir besar. Untuk memperkecil kesalahan data, yaitu perbedaan data TMA antara AUTO dengan papan duga air saat pemantauan berkala, dapat dilakukan dengan metode matematis tertentu pada saat pengolahan data.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada tim laboratorium Balai Litbang Hidrologi dan Tata Air atas bantuannya dalam pelaksanaan ujicoba. Penulisan makalah ini tidak lepas dari bimbingan para peneliti senior Hidrologi khususnya Dra. Heni Rengganis, Ir. Firdaus Larosa, MT, dan Dra. Sri Mulat Yuningsih.

## DAFTAR PUSTAKA

Coz. J. L., Camenen, B., Peyrard, X., dan Dramais, G. 2012. Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method, *Flow Measurement and Instrumentation* 26: 18-29.

Dahmen, E.R. dan Hall M.J., 1990. *Screening of Hydrological Data: Tests for Stationarity and Relative Consistency*. Netherlands: Wageningen International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI.

Despax, A., Perret, C., Garçon, R., Hauet, A., Belleville, A., Le Cozc, J., dan Favre, A., C. 2016. Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. *Journal of Hydrology* Vol 533: 128-140.

Gilmore, T. E., Birgand, F., dan Chapman, K. W. 2013. Source and magnitude of error in an inexpensive image-based water level measurement system, *Journal of Hydrology*, Vol 496: 178-186.

Ginanjari, M. R., Larosa, T. F., dan Kusnendar, A. 2017. Pengembangan Kalibrator Automatic Water Level Recorder (AWLR), *Seminar Hasil Litbang TA 2016 Pusat Litbang Sumber Daya Air*.

Ginting, S. dan Putuhena, W. M., 2014. Sistem Peringatan Dini Banjir Jakarta. *Jurnal Sumber Daya Air*, Vol. 10(1): 71-84.

Indarto, B., Sunarno, H., Fahrudin, M., dan Didiek, B. R. 2015. Pengukuran Ketinggian Permukaan Air Sungai menggunakan Prinsip Tekanan Berbasis Mikrokontroler ATmega328, *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya* Vol. 11(3): 120-126.

ISO/IEC Guide 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.

JCGM. 2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*.

Mulyanto, Parikesit, N. A. dan Utomo, H. 2012. Petunjuk Tindakan dan Sistem Mitigasi Banjir Bandang, *JICA Project on Integrated Disaster Mitigation Management for Banjir Bandang*, Kementerian PUPR.

PUSAIR. 2016. *Modul Penjaga Pos - Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Hidrologi*.

PUSAIR. 2015. *Model Fisik Kalibrator AWLR*.

Riady, R. R., Fauzi, M., dan Suprayogi, I. 2017. Komparasi Model Hidrologi Runtun Waktu Untuk Analisis Hujan – Debit Menggunakan GR4J dan Transformasi Wavelet – GR4J (Studi Kasus: DAS Indragiri bagian Hulu). *Jom FTEKNIK*, Vol. 4 (1).

Roy, D., Roy, A., dan Roy, O. 2016. Automatic water level indicator, *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development Issue*, Issue 6, Vol. 2.

Syofyan, Z., 2016, Kalibrasi Data Curah Hujan dengan Data Debit pada Aliran Sungai Batang Agam. *Jurnal Teknik Sipil ITP* Vol. 3(1).

Tekle, T. T. 2014. Ultrasonic stream bridge sensors (USBS) error in water level estimation. *MS (Master of Science) thesis*, University of Iowa.