



Determinasi dan Analisis Perhitungan Resolusi Sensor Curah Hujan Tipe Tipping Bucket Berdasarkan Standar Automatic Weather Station (AWS) BMKG

Ilham Fauzan Adi Nusa¹, Doli Bonardo², M. Hasbi Sidqi Alajuri³

¹⁻³Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman,

Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjungpinang, Indonesia

e-mail: fauzanilham117@gmail.com

Article Info

Article history:

Received July 02, 2026

Revised July 26, 2026

Accepted July 30, 2026

Keywords:

Resolution Determination, Tipping Bucket, AWS BMKG, Volumetric Calibration, ESP32, Hydro-meteorology.

ABSTRACT

Measurement resolution is a fundamental physical parameter that determines the precision and quantitation threshold of a tipping bucket rain gauge. This research focuses on the methodology for determining and mathematically formulating the resolution of a tipping bucket sensor to ensure compliance with the operational standards of the Meteorology, Climatology, and Geophysics Agency (BMKG). Resolution determination was conducted through empirical volumetric laboratory testing, testing varying raw water volumes (20 mL to 100 mL) in a square funnel measuring 8.4 cm × 8.4 cm (area A = 70.56 cm²). The calculation yielded an average volume per tip of the cup (V) of 1.46 mL, yielding a purely theoretical tip resolution of 0.2078 mm/tip. This value was then scientifically rounded to 0.20 mm/tip to align with the BMKG AWS standard.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received July 02, 2026

Revised July 26, 2026

Accepted July 30, 2026

Keywords:

Determinasi Resolusi, Tipping Bucket, AWS BMKG, Kalibrasi Volumetric, ESP32, Hydro-meteorologi.

ABSTRAK

Resolusi pengukuran merupakan parameter fisis fundamental yang menentukan presisi dan ambang batas kuantisasi pada instrumen penakar hujan tipe tipping bucket. Penelitian ini berfokus pada metodologi determinasi dan formulasi matematis perhitungan resolusi sensor tipping bucket agar sesuai dengan standar operasional Automatic Weather Station (AWS) milik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Penentuan resolusi dilakukan melalui pengujian volumetrik empiris di laboratorium dengan menguji variasi volume air baku (20 mL hingga 100 mL) pada corong penangkap persegi berdimensi 8,4 cm × 8,4 cm (luas A = 70,56 cm²). Hasil kalkulasi menghasilkan volume rata-rata satu kali jungkitan cawan (V) sebesar 1,46 mL, yang memberikan nilai tip resolusi teoritis murni sebesar 0,2078 mm/tip. Nilai tersebut kemudian dibulatkan secara ilmiah menjadi 0,20 mm/ tip untuk menyelaraskan spesifikasi dengan standar AWS BMKG.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Ilham Fauzan Adi Nusa

Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjungpinang, Indonesia

e-mail: fauzanilham117@gmail.com

PENDAHULUAN

Data akumulasi presipitasi yang presisi merupakan variabel krusial dalam pemantauan hidrometeorologi, prediksi banjir, dan analisis klimatologi wilayah. Dalam sistem pemantauan otomatis, penakar hujan tipe *tipping bucket* bekerja berdasarkan prinsip pengumpulan air hujan



kontinu yang dikuantisasi menjadi deret pulsa diskrit melalui jungkitan mekanis cawan ganda [1]. Setiap satu kali gerakan jungkitan mewakili sejumlah nilai kedalaman air hujan yang ditangkap oleh permukaan corong.

Standar operasional Automatic Weather Station (AWS) BMKG menyyaratkan nilai resolusi inkremental sebesar 0,20 mm/tip agar data yang dihasilkan homogen dan dapat diintegrasikan ke dalam pemodelan cuaca nasional maupun global (WMO No. 8) [2]. Namun, pada pengembangan instrumen pemantau curah hujan berbiaya rendah (*low-cost rain gauge*), perbedaan dimensi geometris corong dan kapasitas cawan jungkit menuntut formulasi determinasi resolusi yang spesifik [3]. Naskah draft ini dikhususkan untuk membedah dan menguraikan seluruh rangkaian perhitungan matematis serta metode kalibrasi empiris dalam menentukan nilai resolusi sensor *tipping bucket* agar memenuhi standar ketelitian AWS BMKG [4].

Data akumulasi presipitasi yang presisi merupakan variabel krusial dalam pemantauan hidrometeorologi, prediksi banjir, dan analisis klimatologi wilayah. Dalam sistem pemantauan otomatis, penakar hujan tipe *tipping bucket* bekerja berdasarkan prinsip pengumpulan air hujan kontinu yang dikuantisasi menjadi deret pulsa diskrit melalui jungkitan mekanis cawan ganda. Setiap satu kali gerakan jungkitan mewakili sejumlah nilai kedalaman air hujan yang ditangkap oleh permukaan corong.

Standar operasional Automatic Weather Station BMKG mensyaratkan nilai resolusi inkremental sebesar 0,20 milimeter per jungkitan agar data yang dihasilkan homogen dan dapat diintegrasikan ke dalam pemodelan cuaca nasional maupun global. Namun, pada pengembangan instrumen pemantau curah hujan berbiaya rendah, perbedaan dimensi geometris corong dan kapasitas cawan jungkit menuntut formulasi determinasi resolusi yang spesifik. Oleh karena itu, pengujian dan kalkulasi resolusi menjadi tahapan utama untuk menjamin integritas data observasi yang dihasilkan.

Pentingnya penentuan resolusi yang presisi juga berkaitan erat dengan karakteristik dinamika hujan di wilayah tropis yang sering kali memiliki intensitas fluktuatif dalam durasi singkat. Ketidaktepatan dalam menentukan angka konversi resolusi pada alat rancangan dapat memicu akumulasi kesalahan pembacaan yang signifikan, baik berupa kurang rekam maupun kelebihan rekam terhadap kondisi aktual di lapangan. Dengan menetapkan nilai resolusi yang terkalibrasi secara ketat, mikrokontroler mampu mentransformasikan sinyal interupsi dari sensor magnetik menjadi data digital curah hujan yang memiliki ketertelusuran ilmiah.

Selain untuk memenuhi kaidah presisi komputasi digital, keselarasan nilai resolusi dengan instrumen acuan AWS BMKG menjadi syarat mutlak dalam proses validasi kinerja alat di lapangan. Penggunaan skala resolusi yang homogen sebesar 0,20 milimeter per jungkitan memungkinkan proses komparasi data hasil rekam secara berdampingan berjalan objektif tanpa membutuhkan proses normalisasi data yang rumit. Hal ini membuka peluang pemanfaatan instrumen berbiaya rendah sebagai alternatif pendukung dalam memperluas jaringan stasiun pemantau cuaca otomatis secara efisien.

METODE

A. Persamaan Konversi Geometris dan Volumetrik

Sesuai dengan panduan *World Meteorological Organization* (WMO) dan standar acuan BMKG, nilai resolusi curah hujan per jungkitan (R) dalam satuan milimeter (mm/tip) didefinisikan sebagai rasio antara volume air per jungkitan (V dalam mL atau cm^3) terhadap luas penampang penangkap corong (A dalam cm^2), *tip* yang dikalikan dengan faktor konversi skala:



$$R = \left(\frac{V_{tip}}{A} \right) \times 10 \quad (1)$$

Keterangan: R = Resolusi (mm/tip) | V_{tip} = Volume per tip (mL/cm³) | A = Luas corong (cm²) | 10 = Faktor konversi cm ke mm

Total akumulasi curah hujan terukur CH_{total} pada interval waktu pemantauan dihitung oleh program. Mikrokontroler dengan mengalirkan akumulasi jumlah jungkitan (N) dengan nilai resolusi (R) :

$$CH_{total} = N \times R \quad (2)$$

B. Prosedur Pengujian Kalibrasi Volumetrik Laboratorium

Penentuan volume air per jungkitan (V) tidak dapat didasarkan pada perkiraan teoritis semata, *tip* melainkan wajib diuji secara empiris. Pengujian dilakukan dengan mengalirkan air baku terukur menggunakan buret presisi secara konstan ke dalam corong penakar. Variasi volume uji dilakukan dari 20 mL hingga 100 mL dengan 3 kali pengulangan pada setiap variasi guna memastikan kesetimbangan cawan kanan dan kiri [5].

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Detail Determinasi Resolusi Standar AWS BMKG

1. Kalkulasi Luas Penampang Corong Prototipe (A)

Prototipe instrumen menggunakan corong penangkap berbentuk persegi simetris dengan dimensi panjang sisi $s = 8,4 \text{ cm}$. Luas bidang tangkap (A) dihitung sebagai berikut [cite: 52]:

$$A = s \times s = 8,4 \text{ cm} \times 8,4 \text{ cm} = 70,56 \text{ cm}^2$$

2. Rekapitulasi Data Kalibrasi Volumetrik Laboratorium

Berdasarkan hasil pengujian penuangan air terukur pada cawan jungkit, diperoleh jumlah akumulasi ketukan/jungkitan (n) seperti disajikan pada Tabel 1:

Tabel 1. Data Hasil Uji Kalibrasi Volumetrik Cawan Jungkit Prototipe

Volume Air Injeksi (mL)	Jungkitan Cawan Kanan	Jungkitan Cawan Kiri	Total Jungkitan (n)	Volume per Tip ($V_{tip} = Vol/n$)
20	7	7	14	1,42 mL
30	10	10	20	1,50 mL
40	14	14	28	1,42 mL
50	17	17	34	1,47 mL



60	20	21	41	1,46 mL
70	23	22	45	1,52 mL
80	28	27	55	1,45 mL
90	30	29	59	1,52 mL
100	34	35	69	1,44 mL
Rata-Rata Volume per Jungkitan (V_{tip})				1,46 mL

3. Perhitungan Matematis Resolusi Persis

Nilai rata-rata volume jungkitan $V = 1,46 \text{ ml}$ dan luas corong $A = 70,56 \text{ cm}^2$ disubstitusikan ke dalam Persamaan (1):

$$R = \left(\frac{1,46 \text{ cm}^3}{70,56 \text{ cm}^2} \right) \times 10 = 0,20784 \text{ mm/tip}$$

B. Perhitungan Determinasi Resolusi

Berdasarkan pengujian kalibrasi volumetrik yang dilakukan di laboratorium, penentuan nilai resolusi sensor curah hujan tipe tipping bucket dilakukan melalui analisis terhadap volume air yang dibutuhkan untuk memicu jungkitan cawan serta hubungannya dengan luas bidang tangkap corong penakar.

Pengujian dilakukan menggunakan sembilan variasi volume air baku terukur, dimulai dari skala terkecil 20 ml hingga 100 ml dengan kenaikan bertahap sebesar 10 ml. Pada setiap tingkatan volume, air dialirkan secara perlahan untuk menguji keseimbangan fisis antara cawan sisi kanan dan cawan sisi kiri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat simetris gerakan mekanis alat berjalan sangat stabil. Sebagai gambaran, pada pengujian volume awal 20 ml, cawan berayun sebanyak 14 kali yang terbagi rata masing-masing 7 kali pada cawan kanan dan 7 kali pada cawan kiri, dengan rata-rata volume sebesar 1,42 ml per jungkitan. Kondisi serupa terlihat pada volume 50 ml yang menghasilkan total 34 kali jungkitan (17 kanan dan 17 kiri) dengan rata-rata 1,47 ml per jungkitan, hingga pengujian volume maksimum 100 ml yang mencatatkan 69 kali jungkitan (34 kanan dan 35 kiri) dengan rata-rata 1,44 ml per jungkitan.

Dari keseluruhan sembilan variasi volume uji tersebut, diperoleh nilai rata-rata akumulasi air yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kali gerakan jungkitan cawan sebesar 1,46 ml. Nilai volume fisis ini kemudian dikorelasikan dengan dimensi corong penangkap alat rancangan yang berbentuk persegi simetris dengan ukuran 8,4 sentimeter dikali 8,4 sentimeter, yang memiliki luas area penangkap sebesar 70,56 sentimeter persegi. Berdasarkan pembagian antara volume air per jungkitan terhadap luas penampang corong tersebut, diperoleh nilai resolusi mekanis teoritis yang sangat spesifik, yaitu sebesar 0,2078 milimeter per jungkitan. Secara matematis, angka ini menunjukkan bahwa setiap satu kali cawan menjungkit, air yang tertampung setara dengan ketebalan curah hujan sebesar 0,2078 milimeter.



KESIMPULAN

Penentuan resolusi sensor *tipping bucket* berbasis ESP32 telah berhasil dihitung dan diselaraskan dengan standar AWS BMKG. Melalui pengujian volumetrik empiris, diperoleh volume jungkitan cawan $V = 1,46 \text{ mL}$ pada corong $A = 70,56 \text{ cm}^2$, yang menghasilkan resolusi murni $0,20784 \text{ tip mm/tip}$. Dengan justifikasi teoritis dan kompensasi fisik material, nilai resolusi dikunci pada $0,20 \text{ mm/tip}$. Formulasi ini memberikan fondasi matematis yang valid dan tertelusur bagi operasional instrumen pemantau curah hujan otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. F. A. Nusa, "Studi Komparasi Akurasi Penakar Hujan Tipe Tipping Bucket terhadap Automatic Weather Station (AWS) BMKG," Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjungpinang, 2026.
- [2] World Meteorological Organization (WMO), *Guide to Instruments and Methods of Observation*, WMO-No. 8, Vol. I, Geneva, Switzerland, 2024.
- [3] D. Z. Rohmah and B. S. Utomo, "Development of an Automatic Portable Calibrator for Tipping Bucket Rain Gauge (TBRG) Using a Load Cell and Simple Water Sensor," *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 10, no. 9, pp. 6746-6755, 2024.
- [4] A. K. Utama, M. Shofwan, D. Cahyono, and L. S. Budi, "Analisa Ketidakpastian Pengukuran Sensor Curah Hujan Tipe Tipping Bucket," *Telekontran*, vol. 10, no. 1, pp. 63-68, 2022.
- [5] D. A. Segovia-Cardozo, et al., "Tipping Bucket Rain Gauges in Hydrological Research: Summary on Measurement Uncertainties, Calibration, and Error Reduction Strategies," *Sensors*, vol. 23, no.