การปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลในระบบการวัดน้ำฝนของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก

Reducing Systematic Mechanical Error in Rainfall Measurement of Tipping Bucket Rain Gauge

วราวุธ วุฒิวณิชย์,[1] รุ่งโรจน์ ระยับพันธุ์[1] และ ระวี อยู่สำราญ[1]*

Varawoot Vudhivanich,[1*] Rungrote Rayuppun[1] and Rawee Yuesamran[1]

Received 6 September 2019, Accepted 27 April 2020

ABSTRACT

Under this research, the tipping bucket rain gauge calibration set in laboratory was developed as a tool for studying the mechanical error in rainfall measurement. The tipping bucket rain gauge of 0.25 mm-resolution was used in the experiment. The result of adjusting rainfall intensity for 137 trials showed that the test tipping bucket rain gauge accurately measured the rainfall when the intensity was less than 50 mm/hr. When rainfall intensity exceeded 50 mm/hr, the tipping bucket rain gauge gave under estimated measurement. The measurement error was 20 mm/hr for the rainfall intensity 200 mm/hr. Two approaches were conducted to reduce this measurement error. Those are (1) adjusting the tipping bucket measured rainfall by the calibration equation and (2) adjusting the bucket resolution by the amount of water loss. Both approaches showed a satisfactory result in reducing the measurement error. Thus, the calibration of tipping bucket rain gauge is recommended when it is used in the area of high intensity rainfall, exceeding 50 mm/hr.

Keywords: Tipping Bucket Rain Gauge, Automatic Weather Station, Rainfall Measurement Error, Rain Gauge Calibration, Tipping Bucket Resolution

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์สอบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกในห้องปฏิบัติการเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลในการวัดปริมาณน้ำฝน ผลการทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกซึ่งมีค่าความจุถ้วยกระดก 0.25 มม. โดยการปรับเปลี่ยนอัตราการตกของฝนระหว่าง 2 ถึง 205 มม./ชม. พบว่าเครื่องวัดน้ำฝนที่ทดสอบมีความแม่นยำดีในช่วงที่ฝนตกไม่เกิน 50 มม./ชม. ถ้าฝนตกเกิน 50 มม./ชม. เครื่องวัดน้ำฝนจะให้ค่าปริมาณน้ำฝนต่ำกว่าค่าจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากถึง 20 มม./ชม. เมื่อฝนตกในอัตรา 200 มม./ชม. ผลการทดลองเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณน้ำฝน 2 วิธี คือ (1) การปรับค่าโดยใช้สมการสอบเทียบ และ (2) การปรับ

[1*] ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีเพื่อการชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Irrigation Technology Research Lab., Department of Irrigation Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom, 73140 Thailand.

* Corresponding author: E-mail address: fengvwv@ku.ac.th

ค่าความจุถ้วยกระดกด้วยค่าปริมาณการสูญเสียน้ำ พบว่าทั้งสองวิธีสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดน้ำฝนลงได้มาก จึงเสนอแนะว่าควรมีการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ถ้าต้องใช้เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกในพื้นที่ที่ฝนมีความเข้มสูงเกิน 50 มม./ชม.

คำสำคัญ: เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบถ้วยกระดก สถานีตรวจวัดภูมิอากาศอัตโนมัติ ความคลาดเคลื่อนในการวัดฝน การสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝน ความจุของถ้วยกระดก

คำนำ

เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (Tipping Bucket) เป็นเครื่องมือวัดน้ำฝนที่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย ทั้งนี้เพราะเครื่องวัดน้ำฝนดังกล่าวมีความแม่นยำสูงเมื่อใช้งานในช่วงที่ความเข้มฝน (Rainfall Intensity) ไม่สูงมาก สามารถแสดงผลในระบบดิจิทัลทำให้สามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเตอร์เน็ตเพื่อรายงานข้อมูลได้ตามเวลาจริง อย่างไรก็ตามเครื่องวัดน้ำฝนแบบนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดสูงพอสมควรถ้าฝนมีความเข้มสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ Marsalek (1981) ได้ทำการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก 3 แบบในห้องปฏิบัติการ และสรุปว่าถ้าฝนที่ตกมีความเข้มน้อยกว่า 25 มม./ชม. ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยมาก (<0.14 มม./ชม.) แต่ถ้าฝนมีความเข้มสูงมากกว่า 200 มม./ชม. เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกจะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจริง หรือเกิดความคลาดเคลื่อนในทางลบ (Under Estimate) มากกว่า 10% เนื่องจากมีการสูญเสียปริมาณน้ำฝนส่วนหนึ่งเนื่องจากมีน้ำฝนไหลลงสู่ถ้วยขณะที่กำลังกระดกซึ่งถือเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงกลของระบบถ้วยกระดกที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ผลการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกหลายแบบในออสเตรียของ Vasvari (2005) สนับสนุนผลการศึกษาของ Marsalek เกี่ยวกับค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ในการศึกษาได้จำแนกฝนตามค่าความเข้มออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับต่ำ (0-30 มม./ชม.) ระดับสูง (30-180 มม./ชม.) และระดับสูงมาก (>180 มม./ชม.) ผลปรากฏว่าฝนที่มีความเข้มสูงมากมีค่าความคลาดเคลื่อนทางลบสูงถึง 30% พร้อมกับสรุปว่าเครื่องวัดน้ำฝนที่ใช้ถ้วยขนาดใหญ่ (5 ลบ.ซม.) จะมีค่าความผิดพลาดทางลบน้อยกว่าถ้วยขนาดเล็ก (2 ลบ.ซม.) ในทางกลับกันกรณีที่ฝนมีความเข้มต่ำมาก 1 มม./ชม. ค่าที่วัดได้จะสูงกว่าค่าจริงหรือเกิดความคลาดเคลื่อนทางบวกได้ แต่กรณีนี้ถือว่าไม่มีนัยสำคัญต่อการชลประทานหรือการบริหารจัดการน้ำ เพราะค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเพียงหลักทศนิยมของมิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก เพื่อนำมาปรับแก้ค่าที่วัดได้ให้ถูกต้องมากขึ้น Lanza & Stagi (2009) ได้ทำการทดสอบประสิทธิผล (Performance) ของเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกและแบบ Weighing Gauge ในห้องปฏิบัติการ โดยพัฒนาชุดทดสอบที่เรียกว่า Qualification Module for Rainfall Intensity Measurement (QM-RIM) ทำการควบคุมอัตราการตกของฝนที่ 2, 20, 50, 90, 130, 170 และ 200 มม./ชม.พบว่าเครื่องมือวัดฝนแบบถ้วยกระดกที่มีการสอบเทียบ (Calibration)ที่เหมาะสม มีความถูกต้องในการวัดฝนสูง มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดไม่เกิน 2% เครื่องวัดน้ำฝนแบบ Weighing Gauge ให้ค่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ยกเว้นช่วงฝนมี่มีความเข้มสูง แต่เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกที่ไม่ได้มีการสอบเทียบหรือสอบเทียบไม่ถูกต้อง มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดสูง และค่าความคลาดเคลื่อนจะสูงขึ้นเมื่อฝนมีความเข้มสูงขึ้น ค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10% เมื่อฝนมีความเข้ม 100 มม./ชม. หรือมากกว่า

ความคลาดเคลื่อนในการวัดฝนที่เกิดจากกลไกของระบบถ้วยกระดกจะส่งผลต่อการหาค่ารอบปีการเกิดซ้ำ (Return Period) ของฝนที่มีความเข้มสูงที่ตกในช่วงเวลาสั้นๆ (La Barbera *et al.*

2002) ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการวัดของเครื่องมือวัดน้ำฝน ได้แก่ ความแปรปรวนของความเข้มฝน ลม การสูญเสียน้ำขณะทำการวัด และอุณหภูมิอากาศ Colli *et al.* (2014) ได้พัฒนาวิธีการประเมินความถูกต้องแม่นยำของเครื่องวัดฝนในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะฝนที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบพลวัต (Dynamic Conditions) โดยการสร้างเครื่องจำลองการตกของฝน (Rainfall Simulator) ที่สามารถควบคุมอัตราการตกของฝนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามการตกของฝนจริง ผลการศึกษาโดยใช้ค่าฝนในช่วง 1 นาที (1 Minute Resolution Rainfall) พบว่าสภาพภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมขณะวัดมีผลต่อค่าความแตกต่างระหว่างฝนที่วัดในห้องปฏิบัติการและฝนที่วัดในสนามน้อยมาก และพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดฝนด้วยระบบถ้วยกระดกมีความสัมพันธ์กับความเข้มฝนในรูปของสมการยกกำลังแบบ 3 พารามิเตอร์ ดังสมการ

$$e_{rel} = y_o + aRI^b \quad (1)$$

เมื่อ e_{rel} = เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ซึ่งคำนวณจากสามการ

$$e_{rel} = 100\frac{(TBRI-RI)}{RI} \quad (2)$$

RI = ค่าความเข้มฝนที่ควบคุม (Reference Intensity) โดยเครื่องจำลองการตกของฝน

TBRI = ค่าความเข้มฝนที่เครื่องวัดได้โดยเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (Tipping Bucket Recorded Intensity)

Y_o, a, b = สัมประสิทธิ์ของสมการซึ่งมีค่าเท่ากับ -6.394, -1.290, 0.473 ตามลำดับ

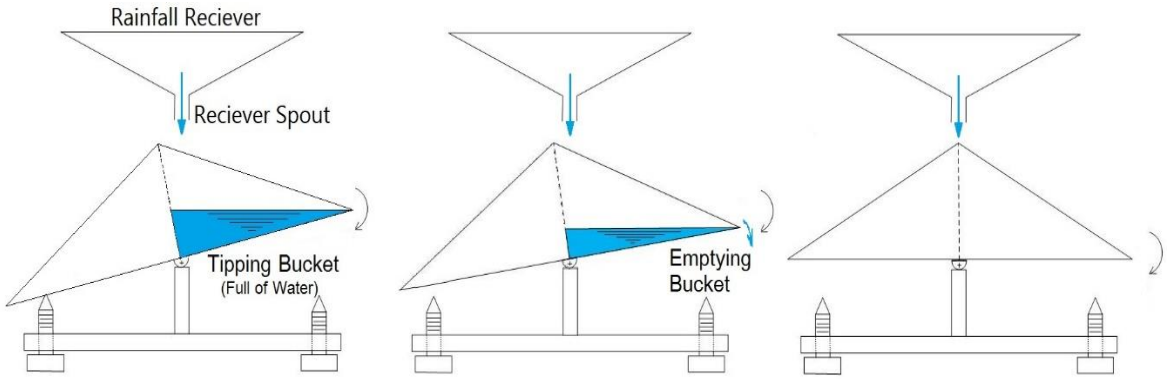
ผลการทดลองพบว่า e_{rel} มีค่ามากกว่า 20% เมื่ออัตราการตกของฝนเกิน 150 มม./ชม.

ข้อสรุปจากการวิจัยนี้นำไปสู่การพัฒนาวิธีการประเมินความแม่นยำในการวัดฝนในห้องปฏิบัติการ และต่อการพัฒนาปรับปรุงเครื่องวัดฝนในสนามที่มีความแม่นยำมากขึ้น Lanza & Stagi (2008; 2009) จึงแนะนำว่าควรมีการพัฒนาระบบการสอบเทียบ มีมาตรฐานการสอบเทียบ และมีการออกใบรับรองค่าความแม่นยำในการวัดซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Vasvari (2005) ที่เสนอแนะให้มีการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกทุกๆ 2-3 ปี เป็นอย่างน้อย เนื่องจากความแม่นยำในการวัดของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกอาจมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการใช้งาน ประเทศไทยมีการใช้เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกกันมากโดยเฉพาะระบบการวัดภูมิอากาศแบบตามเวลาจริง (Automatic Weather Station) แต่ยังไม่ค่อยมีการพูดถึงประเด็นความคลาดเคลื่อนเชิงกลของระบบถ้วยกระดก และการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าว และแนวทางในการปรับแก้ค่าฝนที่วัดได้ให้ถูกต้องต่อไป

การสูญเสียน้ำปัจจัยสาเหตุของค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดน้ำฝนด้วยระบบถ้วยกระดก

เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกถูกออกแบบให้ถ้วยสามารถรับน้ำฝนได้ในปริมาณหนึ่งซึ่งเรียกว่า ความจุของถ้วยกระดก (Resolution) เช่น 0.1, 0.25 หรือ 0.5 มม. ซึ่งเมื่อน้ำฝนปริมาณดังกล่าวไหลลงสู่ถ้วย น้ำหนักน้ำจะทำให้ถ้วยเกิดการกระดก แต่ถ้าขณะที่ถ้วยกำลังกระดก ถ้ายังมีน้ำฝนไหลลงสู่ถ้วยดังกล่าว ปริมาณน้ำฝนส่วนนี้ถือเป็นการสูญเสียน้ำ (Loss of Water) และก่อให้เกิด

ความคลาดเคลื่อนในการวัด เนื่องจากการสูญเสียน้ำขณะที่ถ้วยกำลังกระดกเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ (Bruce & Clark, 1966; WMO, 1973) จึงจำเป็นต้องทราบปัจจัยที่มีผลต่อการสูญเสียน้ำที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดฝนดังกล่าว Figure 1 แสดงกลไกการกระดกและการเกิดการสูญเสียน้ำ



(a) Bucket Filled with Rain and Start Tipping

(b) Bucket Tipping Continued While Water Loss Occurred

(c) Bucket Passing Receiver Spout and End of Water Loss

Figure 1 Tipping Process Showing Water Loss During Rainfall Measurement

ตามหลักการทำงานของเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ปริมาณฝนที่ตกจะมีค่าเท่ากับค่าความจุถ้วยกระดกคูณด้วยจำนวนครั้งที่ถ้วยกระดก (Number of Tipping) เมื่อทราบระยะเวลาที่ฝนตกจะสามารถนำไปคำนวณหาความเข้มฝนที่ตกได้ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการหาความเข้มฝนได้ดังนี้

$$D = d * n \quad (3)$$

$$i_m = \frac{D}{t_t * n} = \frac{d}{t_t} \quad (4)$$

เมื่อ

i_m = ค่าความเข้มฝนที่วัดได้ (Measured Rainfall Intensity) (มม./ชม.)

d = ค่าความจุของถ้วยกระดก (Resolution) หรือปริมาณความลึกฝนต่อการกระดก 1 ครั้ง (มม.)

n = จำนวนครั้งที่ถ้วยกระดก

D = ปริมาณฝนทั้งหมดที่ตก (มม.)

t_t = ระยะเวลาระหว่างการกระดกแต่ละครั้ง (ชม.)

กำหนดให้

$$t_t = t_f + \Delta t \quad (5)$$

เมื่อ

t_f = ระยะเวลาที่ใช้ในการเติมน้ำลงถ้วยกระดกจนเต็ม (Filling Time) (ชม.)

Δt = ระยะเวลานับจากถ้วยเริ่มกระดกจนถ้วยเคลื่อนที่ผ่านจุดรับน้ำ (ชม.) ซึ่งก็คือระยะเวลาที่เกิดการสูญเสียน้ำ (Water Loss Time)

แทนค่า t_t จากสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 4 จะได้

$$i_m = \frac{d}{t_f + \Delta t} \quad (6)$$

ค่า t_f สามารถคำนวณได้ เมื่อทราบขนาดความจุของถ้วยกระดก และค่าความเข้มของฝนที่ตกจริง ดังสมการ

$$t_f = \frac{d}{i_a} \quad (7)$$

เมื่อ

i_a = ความเข้มฝนจริง (Actual Rainfall Intensity) (มม./ชม.)

แทนค่า t_f ลงในสมการที่ 6 จะได้

$$i_m = \frac{d}{\frac{d}{i_a}+\Delta t}$$

$$\frac{i_m}{i_a} = \frac{d}{d+i_a\Delta t} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) จะเห็นได้ว่า ถ้า Δt มากกว่า 0 ค่า i_mจะน้อยกว่า i_aหรือสรุปได้ว่าเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกจะให้ค่าความเข้มฝนที่วัดได้ (i_m) ต่ำกว่าค่าความเข้มฝนจริง (i_a) แต่จะต่ำกว่ามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่า Δt และ d ถ้า Δt เพิ่มขึ้น หรือ d น้อยลง จะมีผลทำให้เครื่องมือวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจริงเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วนความเข้มฝนที่วัดได้ต่อความเข้มฝนจริง (i_m/i_a) ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ซึ่งได้แก่ ระยะเวลาที่เกิดการสูญเสียน้ำ (Δt) ขนาดความจุของถ้วยวัดน้ำฝน (d) และค่าความเข้มฝนจริง (i_a) ดังสมการที่ 8 (Marsalek, 1981) เช่น ถ้า i_a= 200 มม./ชม. Δt=0.2/3600 ชม. และ d= 0.25 มม./การกระดก 1 ครั้ง จะได้ i_m/i_a = 0.957 หรือค่าเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อน = 100 $(i_m-i_a)/i_a$= 100 (i_m/i_a-1) = -4.3%

แนวทางการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสูญเสียน้ำ

การแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนในทางลบ (Under Estimate) ทำได้โดยการออกแบบถ้วยกระดกให้เริ่มกระดกที่ปริมาณฝนน้อยกว่าค่า d ในสมการที่ 8 เพื่อชดเชยปัญหาการสูญเสียน้ำที่อาจเกิดขึ้นในช่วง Δt ดังนั้นถ้าความจุของด้วยกระดกลดลงเท่า Δd จะสามารถเขียนสมการที่ 7 ได้ใหม่ดังนี้

$$t_f = \frac{d-\Delta d}{i_a} \quad (9)$$

เมื่อ Δd = ค่าปรับแก้ความจุถ้วยกระดกเพื่อชดเชยการสูญเสียน้ำระหว่างการวัด

แทนค่า t_f จากสมการที่ 9 ลงในสมการที่ 6 จะได้

$$i_m = \frac{d}{\frac{d-\Delta d}{i_a}+\Delta t}$$

$$\frac{i_m}{i_a} = \frac{d}{d-\Delta d+i_a\Delta t} \quad (10)$$

ถ้า $i_a\Delta t = \Delta d$ ค่า i_m จะเท่ากับ i_a หรือค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

ค่าปรับแก้ Δd ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มฝนจริง (i_a) และค่า Δt จากตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว ถ้า i_a= 200 มม./ชม. Δt = 0.2/3600 ชม. จะได้ Δd = 200x0.2/3600=0.011มม. และขนาดความจุถ้วยกระดกเพื่อชดเชยการสูญเสียน้ำจะเท่ากับ (d-Δd) = 0.25-0.011 = 0.239 มม. สิ่งสำคัญในการออกแบบขนาดความจุถ้วยกระดกคือการกำหนดค่าฝนอ้างอิง (Reference Intensity หรือ RI) ของฝน โดยสมมติว่า RI คือตัวแทน i_a ในสมการที่ (10) แต่ถ้าฝนที่วัดด้วยระบบถ้วยกระดกมีค่า i_a ต่างจากค่าอ้างอิง RI จะมีผลทำให้การวัดปริมาณฝนด้วยระบบถ้วยกระดกมีความคลาดเคลื่อนได้ นอกจากนี้ Δt ยังอาจเปลี่ยนไปตามค่า i_a ซึ่งอาจต่างจากค่าที่ใช้ออกแบบในสมการที่ 10 และมีผลทำให้ $i_a.\Delta t$ ไม่เท่ากับ Δd และการวัดฝนด้วยระบบถ้วยกระดกจึงอาจจะยังมีความคลาดเคลื่อนได้ อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะน้อยกว่ากรณีที่ออกแบบความจุถ้วยกระดกโดยไม่ได้มีชดเชยปริมาณการสูญเสียน้ำ (Δd)

ผู้ผลิตเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกส่วนใหญ่ได้พยายามออกแบบเครื่องวัดน้ำฝนโดยมีการชดเชยค่าการสูญเสียน้ำอยู่แล้ว อย่างไรก็ตามถ้าฝนที่ตกจริงมีค่าความเข้มมากหรือน้อยกว่า RI ค่าความคลาดเคลื่อนจะยังคงอยู่ จึงจำเป็นต้องทราบปัจจัยที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนและความเข้มฝนจริง วิธีการสอบเทียบระบบถ้วยกระดก ตลอดจนวิธีการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวัดปริมาณน้ำฝนด้วยเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกในห้องปฏิบัติการ ได้ใช้เครื่องวัดน้ำฝนซึ่งกรวยรับน้ำฝนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. มีค่าความจุของถ้วยกระดก (d) 0.25 มม. ทำการพัฒนาอุปกรณ์ควบคุมการจ่ายน้ำให้เครื่องวัดน้ำฝนซึ่งสามารถปรับอัตราการจ่ายน้ำแบบคงที่ได้ตามความต้องการ โดยการควบคุมระยะระหว่างระดับน้ำในถังและหัวจ่ายน้ำ (Controlling Head) ให้คงที่ โดยใช้ระบบลูกลอยดัง Figure 2 ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยน Controlling Head เพื่อเปลี่ยนอัตราการจ่ายน้ำแบบคงที่จากอัตราน้อยที่สุดจนถึงประมาณ 200 มม./ชม. ในแต่ละการทดลอง บันทึกปริมาตรน้ำ (V) และเวลา (T) ที่ใช้ในการจ่ายน้ำให้เครื่องวัดน้ำฝน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราการจ่ายน้ำซึ่งเรียกว่า Reference Intensity (RI) ดังสมการที่ (11) พร้อมนับจำนวนครั้งในการกระดก (n) และบันทึกลง SD Card โดยใช้บอร์ดของ Arduino รุ่น UNO R3 เพื่อนำไปคำนวณหาค่า Tipping Bucket Recorded Intensity (TBRI) ดังสมการที่ (12) นำค่า RI และ TBRI มาวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อน และสร้างสมการสอบเทียบเพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ทำการทดลองโดยปรับ Controlling Head 137 ครั้ง ครอบคลุมค่าอัตราการจ่ายน้ำ (RI) ระหว่าง 2 – 205 มม./ชม.

$$RI = \frac{10V/A}{T} \qquad (11)$$

เมื่อ RI = อัตราการจ่ายน้ำ (มม./ชม.)

V = ปริมาตรน้ำที่ใช้ (ซม.^{3})

A = พื้นที่หน้าตัดของกรวยรับน้ำฝนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. (ซม.^{2})

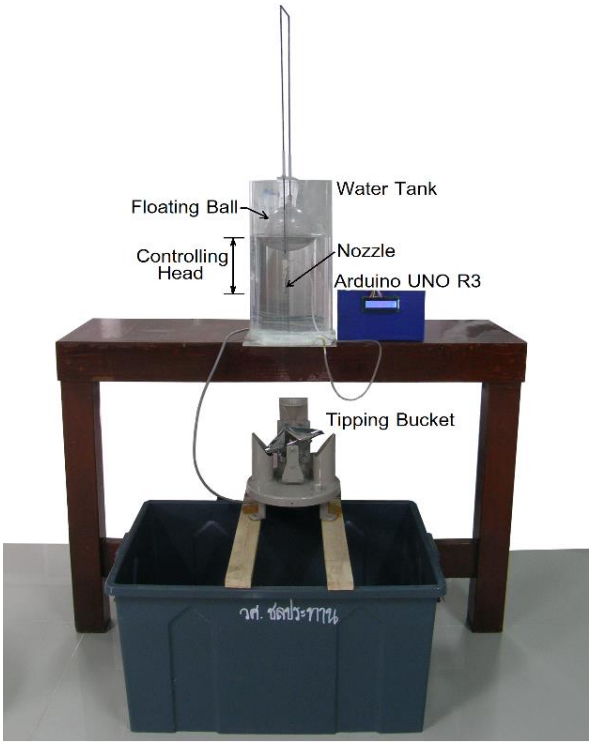
T = เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชม.)

$$TBRI = \frac{nd}{T} \quad (12)$$

เมื่อ TBRI = Tipping Bucket Recorded Intensity (มม./ชม.)
n = จำนวนครั้งที่ถ้วยกระดก
d = ค่าความจุของถ้วยกระดกซึ่งเท่ากับ 0.25 มม.

นอกจากนี้ ขณะทดลองได้ทำการบันทึกภาพการทำงานของการกระดกด้วยกล้องวิดีโอเพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าระยะเวลาที่เกิดการสูญเสียน้ำ (Δt) อันเป็นสาเหตุหลักของค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดในเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบนี้ เมื่อทราบค่า Δt จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าปริมาณการสูญเสียน้ำเนื่องจากน้ำฝนส่วนหนึ่งยังคงไหลลงสู่ถ้วยที่กำลังกระดก และมีผลทำให้ปริมาณน้ำฝนที่ไหลลงสู่ถ้วยกระดกมีค่าสูงกว่าค่าความจุของถ้วยกระดก (d) ที่ออกแบบไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาค่าความจุของถ้วยกระดกที่แท้จริงเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัดน้ำฝนของเครื่องมือ

สุดท้ายทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดฝนของระบบถ้วยกระดกระหว่างการใช้สมการสอบเทียบ และการปรับค่าความจุของถ้วยกระดกเพื่อชดเชยการสูญเสียน้ำที่เกิดขึ้นในขณะที่ถ้วยกำลังกระดก



20 cm-diameter Tipping Bucket Rain Gauge

Figure 2 Tipping Bucket Rain Gauge Calibration Set

ผลและวิจารณ์

1. การสอบเทียบความถูกต้องของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก

ผลการทดลองปรับค่าอัตราการจ่ายน้ำ (RI) เพื่อจำลองการตกของฝนในห้องปฏิบัติการ และบันทึกค่าอัตราการตกของฝนที่วัดด้วยเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (TBRI) จำนวน 137 ครั้ง ครอบคลุมอัตราการตกของฝนระหว่าง 2-205 มม./ชม. พบว่า TBRI มีความสัมพันธ์กับค่า RI ดีมาก R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1.00 และช่วงที่ค่า RI ต่ำกว่า 50 มม./ชม. ค่า TBRI ที่วัดได้มีความสัมพันธ์เกือบเป็นแบบ 1:1 กับค่า RI ดังแสดงใน Figure 3 แสดงว่า

เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกที่ทดสอบมีความคลาดเคลื่อนในการวัดฝนน้อยในช่วงที่ฝนตกน้อยกว่า 50 มม./ชม. แต่เมื่อ RI มากกว่า 50 มม./ชม. ค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดฝนแบบถ้วยกระดก จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

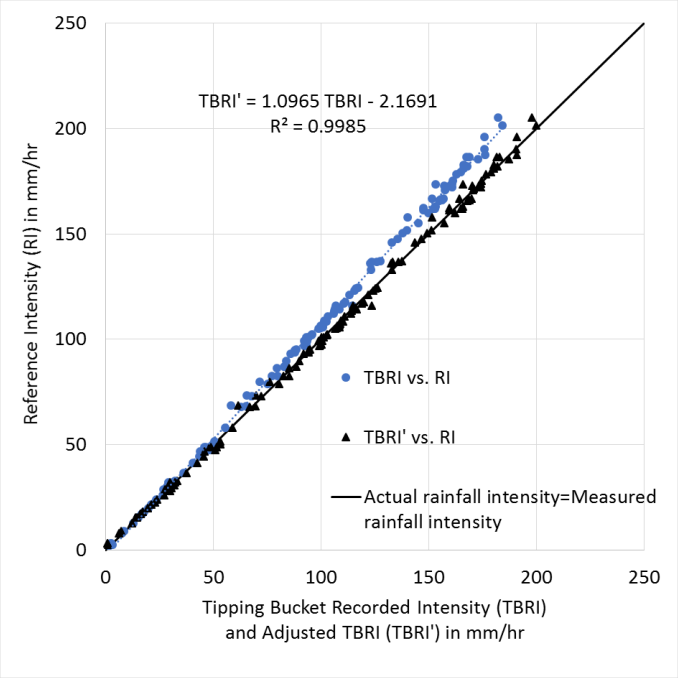
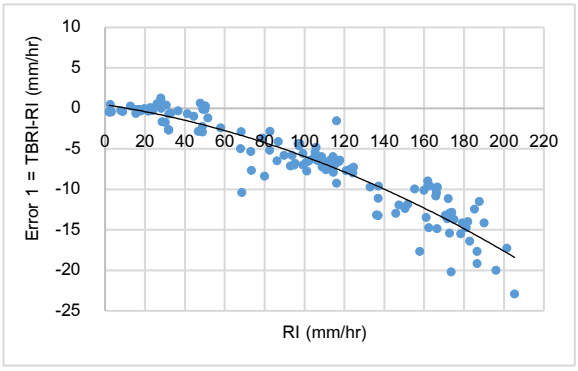
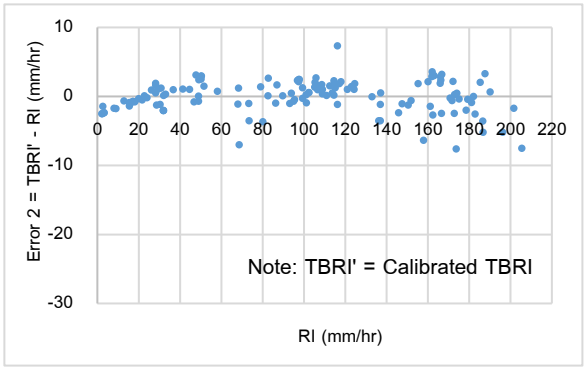


Figure 3 Tipping Bucket Rain Gauge Calibration Curve

ผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณน้ำฝนจากผลการทดสอบ 137 ครั้ง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด (Error 1 = TBRI-RI) เพิ่มขึ้นเมื่อ RI เพิ่มขึ้น ดัง Figure 4(1) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเป็นลบแสดงว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าจริง (Under Estimate) ช่วงที่ RI < 50 มม./ชม. ค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยมาก (ค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.8 มม./ชม.) และค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อ RI >50 มม./ชม. ค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 มม./ชม เมื่อ RI > 130 มม./ชม และประมาณ 20 มม./ชม เมื่อ RI เข้าใกล้ 200 มม./ชม ฝนมีค่าความเข้มสูงกว่า 50 มม./ชม.อาจเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาสั้น ดังตัวอย่างใน Figure 5 กรณีนี้จำเป็นต้องมีการปรับแก้ค่าฝนที่วัดได้ก่อนนำไปใช้งาน



(1) Measurement Error Before Adjusted



(2) Measurement Error After Adjusted

Figure 4 Characteristics of Measurement Errors of Tipping Bucket Rain Gauge

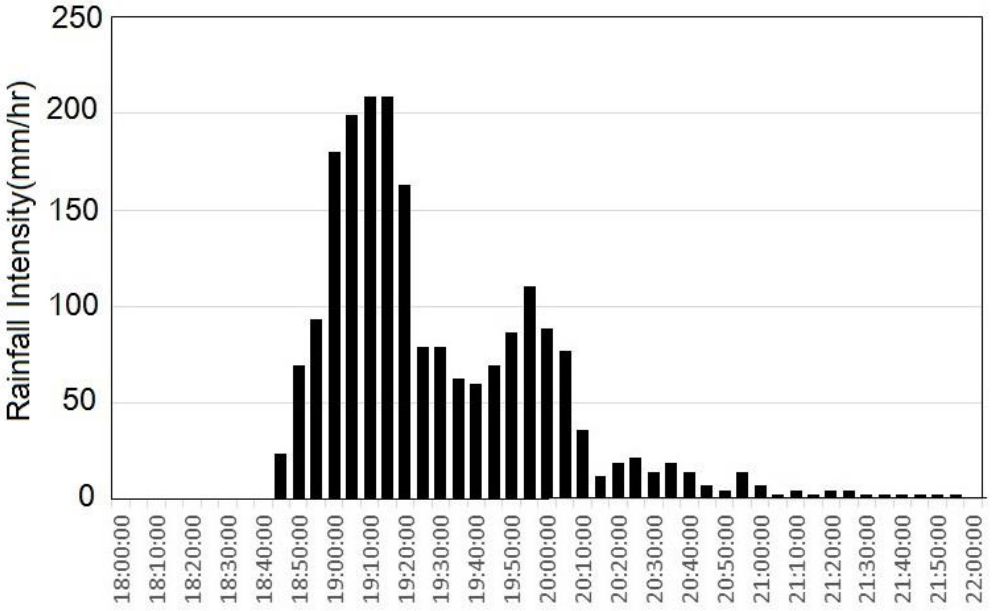


Figure 5 Rainfall Recorded at Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus on 12 May 2019

ผลจากการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าTBRI และ RI มีความสัมพันธ์เชิงเส้นและมีค่า R^2 สูงถึง 0.998 ตาม Figure 3 แต่อย่างไรก็ตามค่า TBRI ที่วัดได้มีค่าต่ำกว่า RI และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง เมื่อ RI มีค่ามากตามที่กล่าวมาแล้ว จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่า TBRI ที่วัดได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง TBRI และ RI ดังสมการ

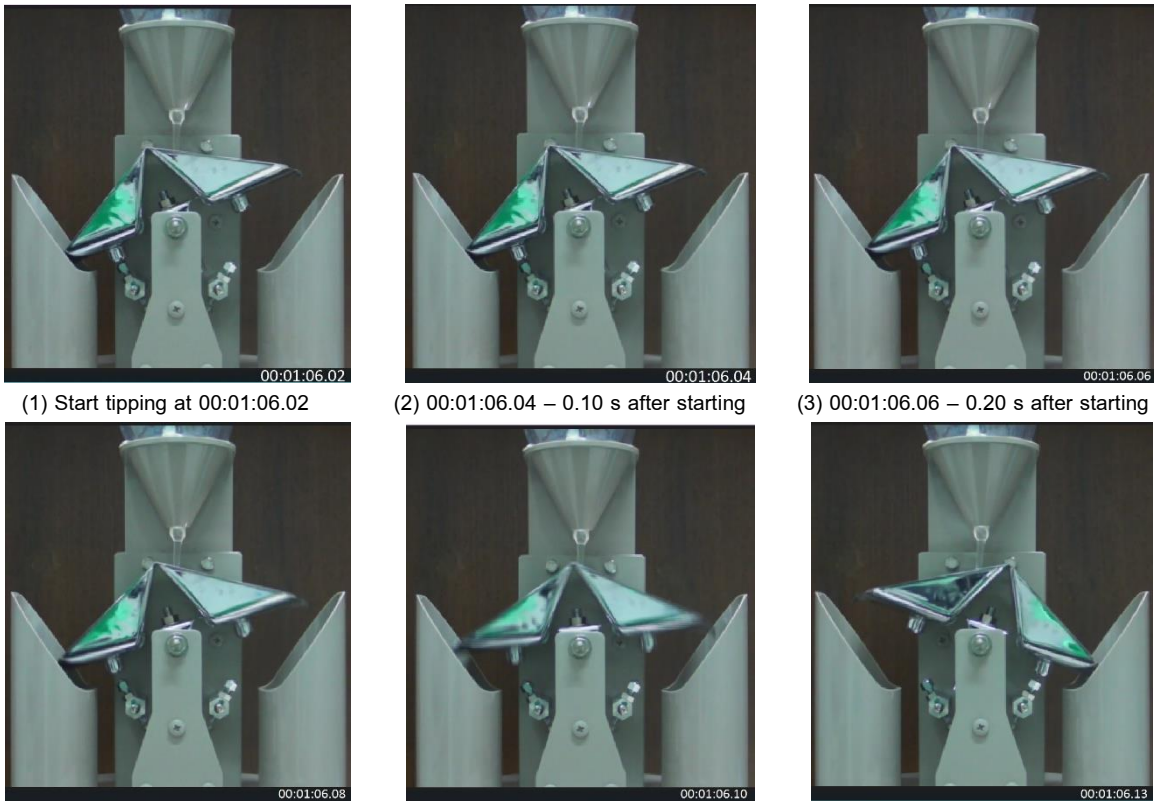
$$\mathrm{TBRI}' = 1.0965\,\mathrm{TBRI} - 2.1691 \qquad (13)$$

เมื่อ TBRI' คือค่า TBRI ที่ปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้สมการสอบเทียบ (สมการที่ 13)

ผลการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนพบว่า TBRI' และ RI มีความสัมพันธ์เกือบเป็นแบบ 1:1 ซึ่งหมายความว่าค่าฝนที่วัดได้เท่ากับค่าจริง ดัง Figure 3 และค่าความคลาดเคลื่อนระหว่าง TBRI' และ RI (Error 2 = TBRI' – RI) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดัง Figure 4(2) ค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) Error 1 และ Error 2 มีค่าเท่ากับ 8.70 และ 2.28 มม./ชม. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกเป็นสิ่งจำเป็นเพราะสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดได้มาก

2. การวัดค่าระยะเวลาการสูญเสียน้ำ (Δt) ด้วยกล้องความเร็วสูง

ระยะเวลานับจากถ้วยเริ่มกระดกจนถ้วยเคลื่อนที่ผ่านจุดรับน้ำ (Δt) เป็นพารามิเตอร์ของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกซึ่งมีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ จึงจำเป็นต้องทราบว่าเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกนั้นๆ มีค่า Δt เท่าไร ในการศึกษานี้ได้ใช้กล้องความเร็วสูงบันทึกภาพแบบเคลื่อนไหวของถ้วยกระดกแล้วนำมาวิเคราะห์หาค่า Δt ได้ ดัง Figure 6 ถ้วยเริ่มกระดกที่เวลา 00:01:06.02 (hh:mm:ss.00) ดัง Figure 6(1) และเวลาที่ถ้วยเคลื่อนผ่านจุดรับน้ำคือ 00:01:06.10 ดัง Figure 6(5) ดังนั้น Δt จะมีค่าเท่ากับ 06.10-06.02 = 0.08 ซึ่งเท่ากับ 0.08x100/20= 0.40 วินาที (หมายเหตุ ตัวเลขหลังจุดทศนิยมของวินาทีมีค่า 1-20 ค่า 20 หมายถึง 1 วินาที)



(1) Start tipping at 00:01:06.02 (2) 00:01:06.04 – 0.10 s after starting (3) 00:01:06.06 – 0.20 s after starting

(4) 00:01:06.08 – 0.30 s after starting (5) 00:01:06.10-0.40 s after starting (6) End tipping at 00:01:06.13

Figure 6 Photos from Video Recorder Showing Time in Decimal of Second During Bucket Tipping from Start to End for 114 mm/hr Reference Intensity

ผลการบันทึกภาพต่อเนื่องของถ้วยกระดกโดยควบคุมอัตราการตกของฝนให้คงที่ ที่ RI เท่ากับ 29, 68, 99, 114, 155, 175 และ 205 มม./ชม. แต่ละค่า RI ที่ทดสอบ สุ่มวัดหาค่าระยะเวลาที่เกิดการสูญเสียน้ำ (Δt) จากภาพต่อเนื่อง 15 ครั้ง พบว่า Δt มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.38 – 0.47 วินาที และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง 0.02-0.08 วินาที ดัง Table 1

Table 1 Loss Time and Loss Depth of Rainfall for Selected Reference Intensity

	Δt in second for different RI(mm/hr)						
Sample No.	29	68	99	114	155	175	205
1	0.40	0.55	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
2	0.40	0.45	0.45	0.35	0.30	0.40	0.40
3	0.40	0.45	0.40	0.35	0.40	0.40	0.35
4	0.45	0.40	0.40	0.40	0.30	0.40	0.35
5	0.45	0.40	0.40	0.40	0.45	0.40	0.45
6	0.65	0.50	0.35	0.35	0.40	0.35	0.35
7	0.45	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.45
8	0.60	0.40	0.45	0.45	0.40	0.35	0.45
9	0.45	0.50	0.40	0.40	0.40	0.35	0.35
10	0.45	0.40	0.45	0.40	0.40	0.35	0.35
11	0.60	0.35	0.35	0.45	0.45	0.40	0.35
12	0.50	0.40	0.35	0.30	0.35	0.40	0.35
13	0.40	0.45	0.35	0.40	0.35	0.35	0.35
14	0.45	0.40	0.35	0.35	0.35	0.40	0.45
15	0.45	0.40	0.35	0.50	0.40	0.40	0.35
Mean in second	0.47	0.43	0.39	0.39	0.38	0.38	0.38
Stdev in second	0.08	0.05	0.04	0.05	0.04	0.02	0.04
L(mm) = RI*Δt/3600	0.0038	0.0081	0.0108	0.0124	0.0165	0.0186	0.0219
% Loss Error = 100L/d	1.5	3.3	4.3	5.0	6.6	7.5	8.7

เมื่อทราบค่า Δt จะสามารถคำนวณหาค่าการสูญเสียน้ำในการกระดกแต่ละครั้ง (L) และเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสูญเสียน้ำ (%Loss Error) ได้จากสมการ

$$L = i_a.\Delta t \quad (13)$$

เมื่อ

L = ปริมาณการสูญเสียน้ำ (มม./การกระดก 1 ครั้ง)

i_a = ความเข้มฝนจริง (Actual Rainfall Intensity) (มม./ชม.)

Δt = ระยะเวลานับจากถ้วยเริ่มกระดกจนถ้วยเคลื่อนที่ผ่านจุดรับน้ำ (ชม.)

$$\% \text{ Loss Error} = 100\frac{L}{d} \quad (14)$$

เมื่อ d = ความจุถ้วยกระดก = 0.25 มม.

ผลการคำนวณพบว่า ค่าการสูญเสียน้ำในการกระดกแต่ละครั้ง มีค่าระหว่าง 0.0038-0.0219 มม./การกระดก 1 ครั้ง และ % ความคลาดเคลื่อนในการวัดมีค่า 1.5% ที่อัตราการตกของฝน 29 มม./ชม. ถึง 8.7% ที่อัตราการตกของฝน 205 มม./ชม. ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการสูญเสียน้ำในการกระดกแต่ละครั้งแปรผันเป็นเส้นตรงกับอัตราการตกของฝน (RI) โดยมีค่า R^2 ใกล้ 1.00 ดัง Figure 7

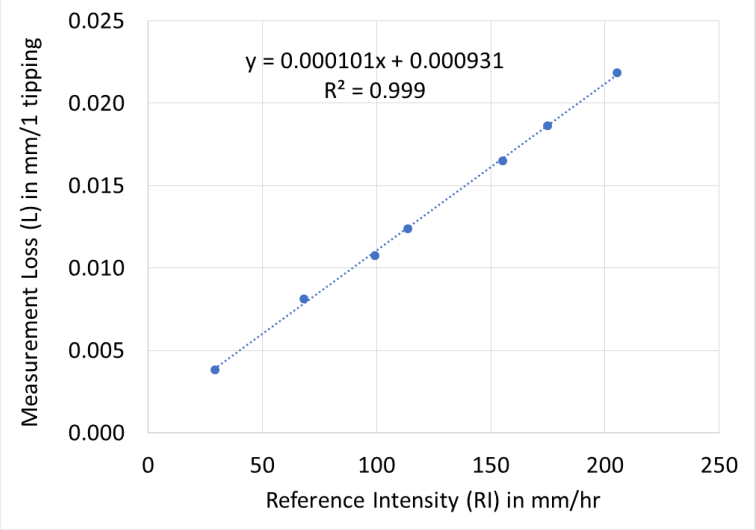


Figure 7 Loss of Water in Tipping Bucket Rain Gauge Measurement

ตามที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าค่า Δt (คุณสมบัติเฉพาะตัวของถ้วยกระดก) และ i_a (คุณลักษณะของฝนที่ตก) คือตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดฝน ถ้าทราบค่าดังกล่าวจะสามารถปรับแก้ค่าฝนที่วัดด้วยเครื่องวัดฝนแบบถ้วยกระดกให้มีความถูกต้องมากขึ้นได้ โดยการปรับค่าความจุถ้วยกระดกของเครื่องวัดฝนแบบถ้วยกระดกด้วยค่า L ที่คำนวณได้จากสมการ

$$L = 0.000101\,RI + 0.000931 \quad (16)$$

นำค่า L จากสมการที่ 16 ไปปรับค่าความจุถ้วยกระดก ตามสมการ

$$d' = d + L \quad (17)$$

เมื่อ d’ = ความจุถ้วยกระดกที่ปรับด้วยค่าปริมาณการสูญเสียน้ำ (มม.)
d = ความจุถ้วยกระดกที่ระบุในรายละเอียดเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (มม.)
L = ปริมาณการสูญเสียน้ำระหว่างการกระดก (มม.)

คำนวณค่าความเข้มฝนใหม่โดยใช้ค่าความจุถ้วยกระดกที่ปรับด้วยปริมาณการสูญเสียน้ำจากสมการ

$$TBRI'' = TBRI\frac{d'}{d} \quad (18)$$

เมื่อ TBRI” คือค่า TBRI ที่ปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้ความจุถ้วยกระดก d’ (มม.)
TBRI คือค่าความเข้มฝนจากเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกที่ไม่ได้ปรับค่า (มม.)

เมื่อนำ TBRI" จากผลการทดสอบ 137 ครั้ง ไปพล็อต (plot) เทียบกับค่า RI ดัง Figure 8 จะเห็นได้ว่า TBRI" และ RI มีความสัมพันธ์เกือบเป็นแบบ 1:1 และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการพล็อต TBRI กับ RI จะเห็นได้ว่า TBRI" มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า TBRI

3. การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในการปรับค่าฝน

ให้ Error 3 = TBRI" – RI ผลเปรียบเทียบรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ของการปรับค่าฝนด้วยสมการสอบเทียบและการปรับด้วยค่าความจุถ้วยกระดกที่ปรับค่าด้วยปริมาณการสูญเสียน้ำ กับฝนที่ไม่ได้ปรับค่ามีค่าดัง Table 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับค่า TBRI ทั้ง 2 วิธี ให้ค่า RMSE ลดลงมากเทียบกับการไม่ปรับค่า กรณีไม่ปรับค่า RSME = 8.7 mm/hr กรณีปรับค่าด้วยสมการสอบเทียบและปรับค่าด้วย d' ค่า RMSE = 2.28 และ 2.63 mm/hr ตามลำดับ การปรับค่าด้วยสมการสอบเทียบให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด จึงเป็นวิธีที่ควรนำไปใช้ในการปรับค่าฝนที่วัดจากเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก

ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงกลของระบบถ้วยกระดกเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อฝนตกในอัตราสูงขึ้น การปรับแก้ค่าฝนที่วัดได้ด้วยสมการสอบเทียบและค่าการสูญเสียน้ำจะช่วยให้ค่าน้ำฝนด้วยระบบถ้วยกระดกมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จึงเสนอแนะให้มีการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกก่อนนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่ฝนมีความเข้มสูงเกิน 50 มม./ชม.

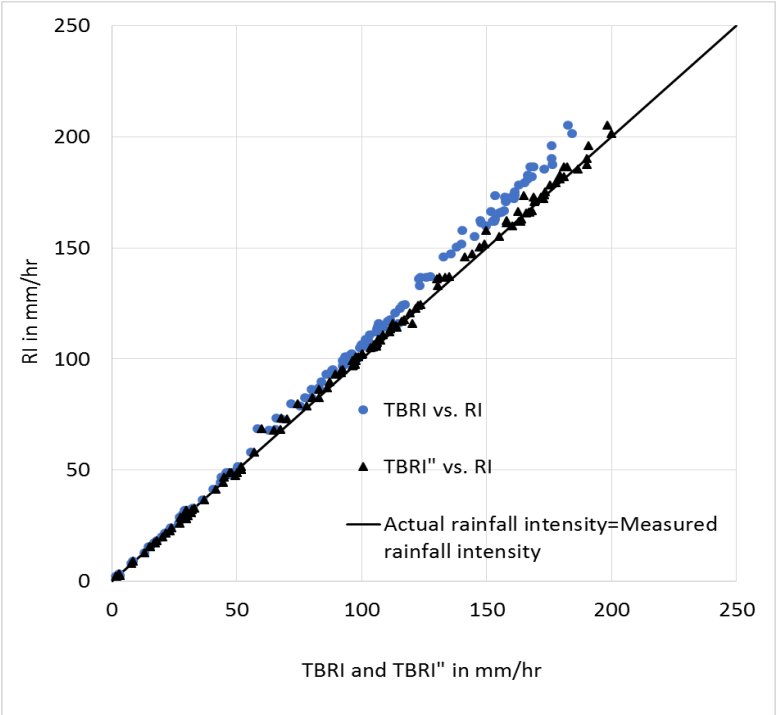


Figure 8 Comparison of Plots Between TBRI" vs. RI and TBRI vs. RI

Table 2 Comparison of RMSE for 3 Cases of Adjusting Rainfall Intensity

Cases	Error	RMSE (mm/hr)
Unadjusted Rainfall Intensity (TBRI)	Error 1 = TBRI – RI	8.70
Adjusted Rainfall Intensity by Calibration Equation (TBRI')	Error 2 =TBRI' – RI	2.28
Adjusted Rainfall Intensity by Water Loss (TBRI")	Error 3= TBRI'' – RI	2.62

สรุป

เครื่องวัดน้ำฝนแบบแบบถ้วยกระดกจะมีความคลาดเคลื่อนเชิงกล ซึ่งเกิดจากการสูญเสียน้ำในช่วงเวลาสั้นๆ ที่น้ำฝนไหลลงถ้วยระหว่างการกระดก และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณน้ำฝนด้วยเครื่องวัดน้ำฝนชนิดนี้ งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ในการสอบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกในห้องปฏิบัติการ ที่สามารถควบคุมอัตราการตกของฝนให้คงที่ สามารถวัดอัตราการจ่ายน้ำ จำนวนครั้งที่มีการกระดกและระยะเวลาที่ทำการตรวจวัด ผลการทดลองเพื่อทดสอบความแม่นยำของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกซึ่งมีค่าความจุถ้วยกระดก 0.25 มม. โดยการปรับอัตราการตกของฝนจาก 2 ถึง 205 มม./ชม. จำนวน 137 การทดลอง พบว่าเครื่องวัดน้ำฝนที่ทดสอบมีความแม่นยำดีในช่วงที่ฝนตกไม่เกิน 50 มม./ชม. ถ้าฝนตกเกิน 500 มม./ชม. เครื่องวัดน้ำฝนที่ทดสอบจะให้ค่าปริมาณน้ำฝนที่ต่ำกว่าค่าจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการตกของฝนจากประมาณ 10 มม./ชม. เมื่ออัตราการตกของฝนมากว่า 130 มม./ชม. และค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มเป็น 20 มม./ชม. เมื่ออัตราการตกของฝนเพิ่มเป็น 200 มม./ชม. ผลการลดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดปริมาณน้ำฝน 2 แนวทาง คือ (1) การใช้สมการสอบเทียบ และ (2) การปรับค่าความจุถ้วยกระดกด้วยค่าปริมาณการสูญเสียน้ำในการกระดกแต่ละครั้ง พบว่าสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดน้ำฝนของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกลงได้มาก ค่า RMSE ลดลงจาก 8.7 มม./ชม. กรณีไม่ได้ปรับค่าเป็น 2.28 และ 2.62 มม./ชม. สำหรับกรณีปรับค่าความคลาดเคลื่อนด้วยสมการสอบเทียบ และกรณีปรับค่าความจุถ้วยกระดกตามลำดับ ดังนั้นจึงเสนอแนะว่าควรมีการสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก ถ้านำเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกไปใช้วัดฝนในพื้นที่ที่ฝนตกหนักเกิน 50 มม./ชม.

เอกสารอ้างอิง

Bruce, J.P., & Clark, R.H. (1966). *Introduction to Hydrometeorology*. Oxford: Pergamon.

Colli, M., Lanza, L. G., La Barbera, P., & Chan, P. W. (2014). Measurement accuracy of weighing and tipping-bucket rainfall intensity gauges under dynamic laboratory testing. *Atmospheric research*, *144*, 186-194.

La Barbera, P., Lanza, L. G., & Stagi, L. (2002). Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes. *Water Science and Technology*, *45*(2), 1-9.

Lanza, L. G., & Stagi, L. (2008). Certified accuracy of rainfall data as a standard requirement in scientific investigations. *Advances in geosciences*, *16*, 43-48.

Lanza, L. G., & Stagi, L. (2009). High resolution performance of catching type rain gauges from the laboratory phase of the WMO Field Intercomparison of Rain Intensity Gauges. *Atmospheric Research*, *94*(4), 555-563.

Marsalek, J. (1981). Calibration of the tipping-bucket raingage. *Journal of Hydrology*, *53*(3-4), 343-354.

Vasvári, V. (2005). Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area. *Atmospheric research*, *77*(1-4), 18-28.

WMO. (World Meteorological Organization) (1973) *Annotated bibliography on precipitation measurement instruments*. Switzerland, Geneva: World Meteorol.