

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ผลการศึกษสามารถแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลด้านการสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝนและเครื่องจำลองน้ำฝน และผลการเก็บข้อมูลความเร็วเสมือนจริงของเครื่องจำลองน้ำฝนที่สร้างขึ้น

#### 4.1 ผลด้านการสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝนและเครื่องจำลองน้ำฝน

##### 4.1.1 ผลการสร้างเครื่องมือวัดน้ำฝน

- การออกแบบเครื่องมือวัดความเร็วสุดท้ายของเม็ดฝน

การวัดความเร็วของเม็ดฝน คณะทำงานได้สร้างเครื่องมือในการเก็บข้อมูลความเร็วน้ำฝนสุดท้าย โดยอ้างอิงทฤษฎีทางฟิสิกส์ 2 รูปแบบ ได้แก่

รูปแบบ 1 อ้างอิงทฤษฎีความเร็ว คือของตำแหน่งต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

โดย ความเร็วเฉลี่ย  $v$  ของวัตถุที่เคลื่อนที่ไปด้วยการกระจัดขนาดหนึ่ง  $\Delta x$  ในช่วงเวลาหนึ่ง  $\Delta t$

เมื่อเม็ดน้ำฝนผ่าน 2 จุด เมื่อได้ระยะทางระหว่าง  $x_2$  ถึง  $x_1$  และได้เวลาระหว่าง  $T_2$  ถึง  $T_1$  จึงนำทฤษฎีดังกล่าวมาใช้ออกแบบเครื่องมือตรวจจับน้ำฝน



รูป 4.1 เครื่องตรวจจับความเร็วน้ำฝนด้วยเซ็นเซอร์

ผลการทดลองในห้องทดลองพบว่าเครื่องตรวจจับความเร็วน้ำฝนสามารถตรวจจับความเร็วเม็ดฝนที่มีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตรได้ แต่ไม่สามารถใช้ตรวจจับความเร็วน้ำฝนในเครื่องจำลองน้ำฝนเนื่องจากขนาดเม็ดฝนที่ผลิตจากหัว Nozzle มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร

## รูปแบบ 2 อ่างอิงทฤษฎีการสั่นสะเทือน



รูป 4.2 เซนเซอร์ตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเมื่อน้ำฝนตกกระทบและเครื่องวัดค่าความสั่นสะเทือน



รูป 4.3 เซนเซอร์ตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนเมื่อน้ำฝนตกกระทบ

หลักการสร้างเครื่องมือคือการประมาณค่าความเร็วของน้ำฝนที่ตกกระทบพื้นดินจากการถ่ายเทโมเมนตัม จากกฎฟิสิกส์พื้นฐาน โมเมนตัม ( $p$ ) ของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ใดๆ สามารถหาจากมวล ( $m$ ) ของวัตถุคูณความเร็ว ( $v$ ) ของวัตถุนั้น หรือเขียนความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ดังนี้  $p=mv$  จากความสัมพันธ์เมื่อทราบโมเมนตัมและมวลของวัตถุ จะสามารถคำนวณหาความเร็วของวัตถุได้

ในการทดลองโมเมนตัมของเม็ดฝนที่ตกจะถูวัดโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ตั้งยังตำแหน่งที่เม็ดน้ำตกกระทบ (เพียโซคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะเปลี่ยนการกระทบเชิงกลเป็นสัญญาณไฟฟ้า) เมื่อมีการตกกระทบของเม็ดน้ำ แรงดันไฟฟ้า (voltage) ที่เพียโซสร้างขึ้นจะแปรผันตรงกับการกระทบที่เกิดขึ้น ขนาดของสัญญาณไฟฟ้าจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดโมเมนตัมของเม็ดน้ำที่ตกกระทบ ตัวอย่างเช่น เมื่อมีเม็ดน้ำขนาดที่มีโมเมนตัมสูงตกกระทบเพียโซ สัญญาณไฟฟ้าจะสูง เป็นต้น และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมที่ตกกระทบและสัญญาณไฟฟ้าที่เพียโซสร้างขึ้น การสอบเทียบเครื่องมือจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

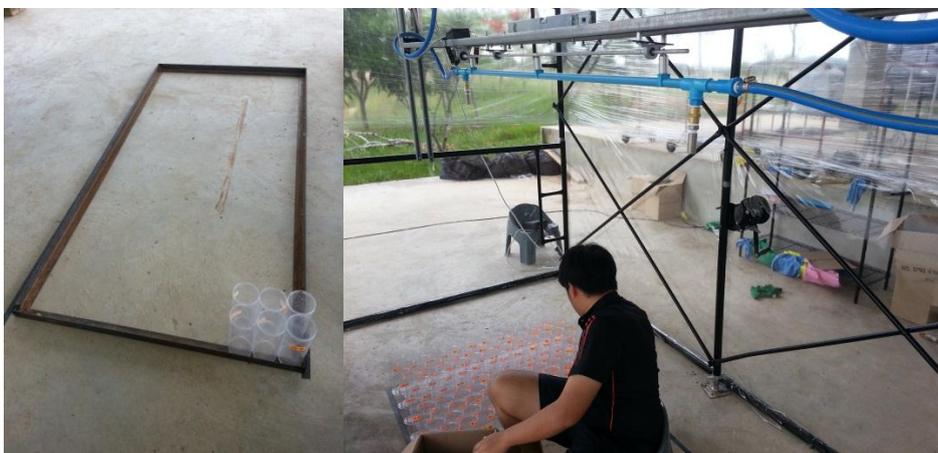
ค่าโมเมนตัมของเม็ดฝนที่ตกกระทบเครื่องมือต้องทราบมวลของเม็ดฝนนั้น เพื่อคำนวณความเร็วตกกระทบ โดยมวล ( $m$ ) ของเม็ดฝน หาจากความหนาแน่น (Density,  $D$ ) และปริมาตร (Volume,  $V$ ) จากความสัมพันธ์  $D=m/V$  เนื่องจากความหนาแน่นของน้ำบริสุทธิ์ คือ  $1 \text{ g/cm}^3$  เมื่อรู้ปริมาตรของเม็ดฝนจะ

สามารถคำนวณหาผลได้ การหาปริมาณเม็ดฝนหาโดยการประมาณให้เม็ดฝนตกกระทบมีรูปร่างเป็นทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมเม็ดฝนคำนวณจากการถ่ายภาพเม็ดฝนที่ตกกระทบเพียโซเพรียบเทียบกับเครื่องมือวัดขนาด เช่น ไม้มบรรทัด

เพื่อให้เครื่องมือที่จัดสร้างมีความแม่นยำและถูกต้องจึงจำเป็นต้องสอบเทียบเครื่องมือ โดยหลอดหยด (dropper) จะถูกติดตั้งในแนวตั้งห่างจากเพียโซตามความสูงกำหนดไว้ พร้อมติดเครื่องมือวัดระยะ เช่น ไม้มบรรทัด ในแนวตั้งเพื่อใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของหยดน้ำ บันทึกภาพวิดีโอการเคลื่อนที่ของหยดน้ำ อัตราการบันทึกภาพ (frame rate) อยู่ประมาณ 30 ภาพต่อวินาที จากจุดเริ่มต้นจนตกกระทบเพียโซ ภาพการเคลื่อนที่ของหยดน้ำในแต่ละเฟรมจะนำมาใช้ประมาณความเร็วของหยดน้ำขณะเคลื่อนที่ และใช้ประมาณปริมาตรของหยดน้ำ เมื่อหยดน้ำตกกระทบเพียโซ จะสามารถเก็บค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากหยดน้ำ (ค่าโมเมนต์ของหยดน้ำ มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนขนาดหยดน้ำ และเปลี่ยนค่าความสูงของหลอดหยด) จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันของสัญญาณไฟฟ้ากับโมเมนต์ของหยดน้ำ ก็จะสามารถคำนวณหาค่าโมเมนต์ของหยดน้ำที่สร้างแรงดันไฟฟ้าขนาดเดียวกัน

ผลการทดลองในห้องทดลองพบว่าเครื่องตอบสนองได้ดีและสามารถตรวจจับความเร็วเม็ดฝนได้ แต่เมื่อนำไปใช้ในเครื่องจำลองน้ำฝนพบอัตราความคลาดเคลื่อนของการสันสะท้อนซึ่งเกิดขึ้นจากประมาณน้ำสะสมบนเพียโซที่ส่งผลให้การสันสะท้อนในเวลาน้ำฝนตกกระทบลดลง และยังพบว่าเม็ดฝนที่ผลิตจากเครื่องจำลองน้ำฝนมีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถตรวจจับการสันสะท้อนได้เมื่อเม็ดฝนตกกระทบเพียโซที่มีการสะสมของน้ำจำนวนมาก อีกทั้งการนำเครื่องมือดังกล่าวไปใช้เก็บข้อมูลในเครื่องจำลองน้ำฝนมักประสบปัญหาการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากน้ำ ส่งผลให้เครื่องตรวจวัดการสันสะท้อนเสียหาย

การศึกษาความเป็นไปได้และประยุกต์ใช้หัวจ่ายน้ำเพื่อการเกษตรในจ่ายน้ำเรียนแบบระบบน้ำฝนตามธรรมชาตินั้น ผู้วิจัยจึงออกแบบวิธีการศึกษาโดยเก็บข้อมูลขนาดเม็ดน้ำ การกระจายของเม็ดน้ำและปริมาณน้ำที่ได้จากการสร้างเม็ดน้ำ เพื่อคัดเลือกหาความสูงที่เหมาะสมระหว่างหัวฉีดกับพื้นผิวดิน ระยะห่างหัวฉีด (เครื่องจำลองน้ำฝนใช้หัวฉีด 2 หัวฉีดให้น้ำ) และความดันน้ำที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเม็ดน้ำฝนเปรียบเทียบกับน้ำฝนจริง โดยใช้ภาชนะพลาสติกขนาด 2 ตารางเมตร (2 เมตร × 1 เมตร) เก็บข้อมูลปริมาณน้ำฝนรวมและใช้ภาชนะทรงกระบอก จำนวนทั้งสิ้น 375 กระบอก จัดเรียงวางในพื้นที่ 2 ตารางเมตร (2 เมตร × 1 เมตร) โดยการชั่งน้ำหนักของน้ำ แต่ละกระบอก 5 ช้าและหาน้ำหนักน้ำเฉลี่ยของแต่ละกระบอกและคำนวณเป็นปริมาณน้ำอีกครั้ง ดังรูป 4.4 และ 4.5

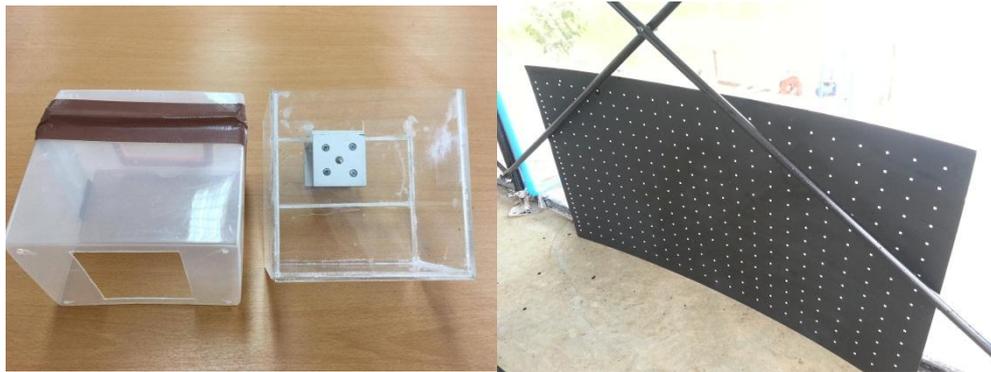


รูป 4.4 ทรงกระบอกเก็บข้อมูลปริมาณน้ำ



รูป 4.5 การเก็บข้อมูลการกระจายของน้ำฝน

สำหรับศึกษาขนาดเม็ดฝน จึงได้สร้างกล่องกันน้ำสำหรับกล้องถ่ายรูปเพื่อใช้ถ่ายรูปเม็ดน้ำในเครื่องจำลองฝน และสร้างแผ่นพลาสติกดำด้านที่มีจุดเทียบขนาดน้ำฝนใช้เป็นฉากหลังสำหรับถ่ายรูปเม็ดน้ำ ดังรูป 4.6



รูป 4.6 กล่องกันน้ำของกล้องถ่ายรูปสำหรับถ่ายขนาดเม็ดฝนและแผ่นพลาสติกดำด้าน

ผลการทดลองใช้พบว่ากำลังขยายของกล่องไม่สามารถนำมาใช้ถ่ายเม็ดน้ำขนาดเล็ก แต่ความเร็วชัดเตอร์ของกล้องถ่ายรูปไม่สามารถถ่ายรูปเม็ดน้ำที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามแรงโน้มถ่วงได้ คณะทำงานจึงเปลี่ยนวิธีเก็บขนาดเม็ดน้ำ โดยและตาข่ายขนาดกว้าง 1 เมตรและยาว 1 เมตรเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลขนาดเม็ดฝน ดังรูป 4.7



รูป 4.7 ตาข่ายสำหรับเก็บข้อมูลขนาดเม็ดฝน

#### 4.1.2 การคัดเลือกหัวฉีดน้ำ

การสำรวจภาคสนามเพื่อคัดเลือกหัวจ่ายน้ำเพื่อการเกษตรที่หาซื้อได้ง่ายและราคาถูก พบ 5 หัวฉีดให้น้ำเพื่อการเกษตรที่มีความเหมาะสมอยู่ 5 ชนิด

แบบที่ 1 หัวฉีดน้ำพลาสติก รุ่น EG-251 (ELEGANCE)



รูป 4.8 หัวฉีดน้ำพลาสติกรุ่น EG-251

ผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวของเม็ดน้ำที่ออกจากหัวฉีดมีการกระจายเป็นครอบคลุมพื้นที่คล้ายรูปโดนัท พื้นที่ภายในวงกลมไม่มีการกระจายเม็ดน้ำ ขาดความสม่ำเสมอในการกระจายเม็ดน้ำและยังให้เม็ดน้ำที่มีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อลดแรงดันน้ำพบว่า แรงดันน้ำส่งผลน้ำที่ส่งออกมาจากจุดศูนย์กลางของหัวฉีดมีลักษณะเป็นแผ่นน้ำ ไม่เป็นเม็ดน้ำ สาเหตุเนื่องจากรูปแบบของหัวฉีดน้ำใช้พลาสติกทรงกลมเป็นแกนในการฉีดพ่นน้ำ ทำให้เม็ดน้ำที่แตกตัวออกมาและตกตามแรงโน้มถ่วงโลกมีขนาดไม่เท่ากัน จึงไม่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นหัวฉีดของเครื่องจำลองน้ำฝน

แบบที่ 2 สปริงเกลอร์พลาสติกใบเขียวโครงหมุนไม่ได้

ปริมาณน้ำใช้ 400-600 ลิตรต่อชั่วโมง ขนาด  $\frac{1}{2}$ " x  $\frac{3}{4}$ " ลักษณะน้ำกระจายเป็นเม็ด มุมน้ำ 45 องศา รัศมีน้ำ 4-5 เมตรที่แรงดัน 1-3 บาร์ (ราคา 9.00 บาท)



รูป 4.9 สปริงเกลอร์พลาสติกใบเขียวโครงหมุนไม่ได้

ผลการทดสอบพบว่าการกระจายตัวของเม็ดน้ำที่ออกจากหัวฉีดมีการกระจายเป็นครอบคลุมพื้นที่เป็นรูปวงกลม ขาดความสม่ำเสมอของปริมาณน้ำและขนาดเม็ดน้ำผลิตได้มีขนาดแตกต่างกันมาก บางครั้งหัวสปริงเกลอร์หมุนด้วยความเร็วเนื่องจากความประณีตและคุณสมบัติของพลาสติกที่ใช้สร้างตัวสับเม็ดน้ำไม่มีคุณภาพทำให้การหมุนไม่สม่ำเสมอ แม้ว่าจะส่งน้ำเข้าด้วยแรงดันน้ำที่เท่ากันก็ตาม จากเหตุดังกล่าวทำให้เกิดหยดน้ำที่มีขนาดขนาดเล็กมากจนถึงใหญ่มาก และเมื่อลดแรงดันน้ำพบว่า แรงดันน้ำส่งผลน้ำที่ส่งออกมาจากจุดศูนย์กลางของหัวฉีดมีลักษณะเป็นเส้น หัวฉีดประเภทนี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นหัวฉีดของเครื่องจำลองน้ำฝน

แบบที่ 3 สปริงเกลอร์ NIC'S แบบไม่มีติ่ง

ปริมาณน้ำใช้ 660 ลิตรต่อชั่วโมง ขนาด  $\frac{1}{2}$ " x  $\frac{3}{4}$ " ลักษณะน้ำกระจายเป็นเม็ด มุมน้ำ 45 องศา รัศมีน้ำ 5 เมตรที่แรงดัน 1.5 บาร์ (ราคา 5.50 บาท)



รูป 4.10 สปริงเกลอร์ NIC'S แบบไม่มีตั้ง

ผลการทดสอบพบว่า การกระจายตัวของเม็ดน้ำที่ออกจากหัวฉีดมีการกระจายไม่สม่ำเสมอ ขนาดเม็ดน้ำที่ผลิตได้มีขนาดแตกต่างกัน พื้นที่ฉีดน้ำเป็นพื้นที่ลักษณะวงกลม ประมาณความเข้มข้นน้ำที่สามารถจ่ายได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามรัศมีที่ห่างออกจากหัวฉีดเพราะแรงเสียดของหัวฉีดส่งผลให้เม็ดน้ำขนาดใหญ่ซึ่งมีน้ำหนักมากถูกสะบัดไปได้ไกลกว่าเม็ดน้ำขนาดเล็ก ความเร็วของการหมุนของหัวสปริงเกลอร์ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของแรงดันน้ำที่ท่อส่งซึ่งอ้างอิงความสม่ำเสมอของการจ่ายน้ำของปั้มน้ำ เมื่อลดแรงดันน้ำพบว่า แรงดันน้ำส่งผลน้ำที่ส่งออกมาจากจุดศูนย์กลางของหัวฉีดมีลักษณะเป็นเส้น หัวฉีดประเภทนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นหัวฉีดของเครื่องจำลองน้ำฝน

แบบที่ 4 สปริงเกลอร์ 3 ใบพัดแบบปักพื้น TAKARA



รูป 4.11 สปริงเกลอร์ 3 ใบพัดแบบปักพื้น TAKARA

ผลการทดลองพบว่า การให้น้ำมีลักษณะเป็นเส้น ขนาดเม็ดน้ำค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่รัศมีการฉีดน้ำกว้าง และการกระจายของน้ำในพื้นที่ส่วนกลางน้อยกว่าพื้นที่ที่ห่างจากหัวฉีด ซึ่งอ้างอิงกับแรงหมุนหัวฉีดที่ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของแรงดันน้ำในระบบ ทำให้หัวฉีดประเภทนี้ไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นหัวฉีดของเครื่องจำลองน้ำฝน

แบบที่ 5 สปริงเกอร์แบบปรับองศาได้

สปริงเกอร์พลาสติก ขนาด 1/2" M หัวฉีดพลาสติก ปรับองศา เกลียวนอก ปริมาณน้ำ 0.53-1.60 ลบ.ม.ต่อ ชม. รัศมีการฉีด 11.2-14.7 เมตร รอบทิศ แรงดันใช้งาน 1.5-3.5 บาร์ (ราคา 150 บาท)



รูป 4.12 สปริงเกอร์แบบปรับองศาได้

ผลการทดสอบการกระจายของตัวของเม็ดน้ำพบว่าในระยะเวลาเดียวกันมีการฉีดน้ำครั้งละทิศทางและหมุนเวียนไปเรื่อยๆ ไม่สามารถให้น้ำกระจายได้ในทุกทิศทางต่อการฉีดหนึ่งครั้งช่วงเวลาเดียวกัน รัศมีการฉีดกว้างมากเกินไป เหมาะกับการให้น้ำหรือพื้นที่ขนาดใหญ่ ขนาดเม็ดน้ำมีขนาดแตกต่างกันมาก ภายหลังเปลี่ยนทิศทางและเริ่มการฉีดน้ำขนาดเม็ดน้ำจะมีขนาดใหญ่และเล็กลงเรื่อยๆ เมื่อระยะทางเข้าใกล้หัวฉีด การกระจายเม็ดน้ำตกเป็นรัศมีวงกลม พื้นที่กลางวงกลมไม่มีการตกของเม็ดน้ำ ทำให้พื้นที่ที่ได้รับน้ำเป็นรูปคล้ายโดนัท การสลับเพื่อเปลี่ยนทิศทางการให้น้ำ ทำให้เกิดเม็ดน้ำขนาดใหญ่ตกลงที่ตัวหัวฉีดและตกกลางพื้นที่ตามแรงโน้มถ่วง หัวฉีดประเภทนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นหัวฉีดของเครื่องจำลองน้ำฝน

ผลการศึกษาพบว่าหัวจ่ายน้ำเพื่อการเกษตรที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาดแต่ละชนิดมีวิธีการกระจายน้ำแตกต่างกันและไม่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสร้างฝนให้เสมือนจริงได้ ผู้วิจัยพยายามคัดเลือกหัวฉีดที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากขนาดของเม็ดน้ำฝนที่จะได้จากหัวฉีดและปริมาณน้ำต้องจ่ายไปยังหัวฉีดนั้นๆ รวมทั้งรัศมีการฉีดน้ำจึงพบว่าหัวฉีดน้ำเพื่ออุตสาหกรรมมีความเหมาะสมและน่าจะสามารถสร้างการเกิดฝนได้เหมือนจริงมากกว่าหัวฉีดน้ำเพื่อการเกษตร

ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาเลือกหัวฉีดชนิด FULL CONE SPRAY NOZZLE 3 ขนาด เพื่อใช้ทดลอง ได้แก่

- NOZZLE 015

MODEL: 1/8MBBXPIJAE-PVDF (SIZE 1/8" MALE, MAT :PVDF)



รูป 4.13 หัวฉีด 015

## - NOZZLE 16

MODEL: 3/8FBBXPISAF-S303 (SIZE 3/8" FEMALE, MAT :S303)



รูป 4.14 หัวฉีด 16

## - NOZZLE 26

MODEL: 1/2MBBXPISBF-S303 (SIZE 1/2" MALE, MAT :S303)



รูป 4.15 หัวฉีด 26

### 4.1.3 การออกแบบโครงสร้างเครื่องจำลองน้ำฝน

#### การออกแบบระบบส่งน้ำ

ใช้ปั้มน้ำหอยโข่งญี่ปุ่น EBARA รุ่น CDA 1.00 M ขนาดมอเตอร์ 0.75 W / 1 แรงม้า ให้แรงดันน้ำสูงสุดที่ 6 บาร์ ปริมาณน้ำ 20 - 90 ลิตรต่อนาที ระยะส่งสูง 21 - 39.5 เมตร ใช้ในการส่งน้ำผ่านระบบกรองน้ำเข้าสู่ระบบเครื่องจำลองน้ำฝน โดยลำเลียงน้ำเข้าผ่านหัวกะโหลกดูดน้ำทองเหลือง สู่ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว เข้าสู่ปั้มน้ำ และส่งออกผ่านท่อ PVC ขนาด 1 นิ้วแยกเป็น 2 เส้นทางส่งน้ำ เส้นทางส่งน้ำแรกผ่านวาล์ววัดความดันก่อนฉีดออกหัวฉีดน้ำ 2 หัวฉีด และเส้นทางที่ 2 ผ่านวาล์วเปิด-ปิดน้ำสำหรับเปิดน้ำออกระบบเพื่อลดความดันน้ำให้ได้ตามระดับที่กำหนดไว้คือ 1 บาร์ 1.5 บาร์ และ 2 บาร์



รูป 4.16 ระบบส่งน้ำของเครื่องจำลองน้ำฝน

#### การออกแบบโครงสร้างหลักของเครื่องจำลองน้ำฝน

การเปลี่ยนแปลงของขนาดเม็ดฝน การกระจายของเม็ดน้ำและความเร็วในการตกกระทบพื้นดินของเม็ดน้ำถูกนำมาพิจารณาเพื่อการออกแบบโครงสร้างของเครื่องจำลองน้ำฝนที่สามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ซึ่งได้แก่ ระดับแรงดันน้ำในท่อส่งน้ำ ความสูงและระยะห่างของหัวจ่ายน้ำ ออกแบบโครงสร้างเครื่องจำลองน้ำฝนที่สามารถถอด-ประกอบและเคลื่อนย้ายได้ง่าย ใช้แนวคิดโครงสร้างของน้้งร้านเพื่อให้ง่ายต่อการถอดประกอบและยังมีโครงสร้างมั่นคงรองรับการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะปั่นหัวฉีด น้้งร้านดังกล่าวถูกนำมาปรับแต่งจนได้ขนาดที่ต้องการและความสูงที่ต้องการคือ กว้าง 2 เมตร ยาว 3 เมตร ความสูง 4 เมตร และมีรางแนวตั้ง 2 ด้านเพื่อรองรับรอกของแกนคานที่จะติดตั้งระบบเหวี่ยงหัวฉีดน้ำ



รูป 4.17 โครงสร้างเครื่องจำลองน้ำฝนที่สามารถปรับเปลี่ยนระดับความสูงและป้องกันผลกระทบจากลม

#### การออกแบบระบบวางตำแหน่งและเหวี่ยงหัวฉีดน้ำ (Nozzle)

คณะทำงานใช้คานอลูมิเนียมแข็งเพื่อหลีกเลี่ยงสนิมเป็นคานหลัก 2 คาน จัดทำจุดติดตั้งหัวฉีดน้ำที่สามารถเลื่อนเปลี่ยนแปลงระยะห่างของหัวฉีดน้ำทั้งสองหัวได้ โดยวัดระยะห่างจากศูนย์กลางของคานและขยับหัวฉีดออกทั้งสองด้าน สำหรับกาเหวี่ยงสะบัดของคานหัวฉีดใช้แรงหมุนจากมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นหลัก สามารถปรับรัศมีของวงสะบัดได้จากสวิตช์ปรับเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าเมื่อถูกคานเหวี่ยงมาสัมผัส

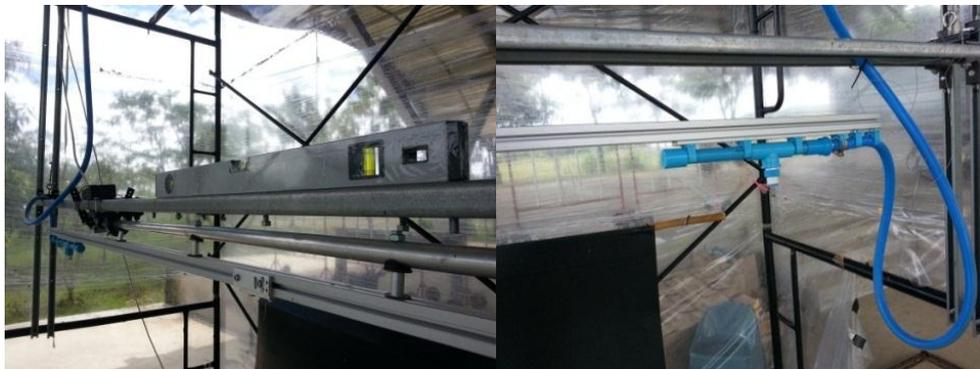
สำหรับระดับความสูงของหัวฉีดจากพื้นผิว งานวิจัยนี้วัดระดับความสูงจากปากหัวฉีด (จุดปล่อยน้ำฝน) ถึงปากกระบอกจัดเก็บน้ำฝน (พื้นผิวดินสมมติ)



รูป 4.18 ระบบควบคุมความเร็วในการสะบัดของหัวฉีด



รูป 4.19 คานเหวี่ยงสับตัวฉีดและมอเตอร์ควบคุมความเร็วในการสับ



รูป 4.20 ระบบติดตั้งหัวฉีดน้ำที่สามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างหัวฉีด

## 4.2 ผลการเก็บข้อมูลความเสมือนจริงของเครื่องจำลองน้ำฝนที่สร้างขึ้น

### 4.2.1 ผลขนาดเม็ดฝน

จากการเก็บข้อมูลขนาดเม็ดฝนโดยมีวิธีการวัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดน้ำ การผลิตน้ำฝนของเครื่องจำลองน้ำฝนพบว่า ค่าตัวกลางขนาดเม็ดฝน ( Median Drop Size :  $D_{50}$ ) มีความแตกต่างกัน โดยเมื่อฝนตกน้อยจะมีขนาดเม็ดน้ำน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรและฝนตกหนัก 40 - 120 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงจะมีเม็ดน้ำขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร (Cerda, 1997)

ตาราง 4.1 ค่าตัวกลางขนาดเม็ดฝน ระดับความสูง 200 เซนติเมตรของหัวฉีด 015

แรงดัน (บาร์)	ขนาดเม็ดฝน (มิลลิเมตร) จากระยะห่างหัวฉีดที่ต่างกัน			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	75 เซนติเมตร	100 เซนติเมตร	125 เซนติเมตร	
1.00	1.250	1.150	1.000	0.126
1.50	1.350	1.200	1.150	0.104
2.00	1.225	1.100	1.175	0.063
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.066	0.050	0.095	

จากตาราง 4.1 หัวฉีด 015 สามารถสร้างเม็ดฝนขนาดตั้งแต่ 1.000 มิลลิเมตรถึง 1.350 มิลลิเมตร พบว่าการให้น้ำที่ความดันแตกต่างกันจะสามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดที่ระยะห่างหัวฉีด 100 เซนติเมตร (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.050) ในส่วนของแรงดันน้ำ พบว่าแรงดันน้ำที่ 2.00 บาร์ สามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดถึงแม้ว่าจะมีระยะห่างหัวฉีดที่แตกต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.063)

ตาราง 4.2 ค่าตัวกลางขนาดเม็ดฝน ระดับความสูง 200 เซนติเมตรของหัวฉีด 16

แรงดัน (บาร์)	ขนาดเม็ดฝน (มิลลิเมตร) จากระยะห่างหัวฉีดที่ต่างกัน			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	75 เซนติเมตร	100 เซนติเมตร	125 เซนติเมตร	
1.00	1.250	1.400	1.350	0.076
1.50	1.300	1.200	1.350	0.076
2.00	1.275	1.300	1.400	0.066
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.025	0.100	0.029	

จากตาราง 4.2 หัวฉีด 16 สามารถสร้างเม็ดฝนขนาดตั้งแต่ 1.200 มิลลิเมตรถึง 1.400 มิลลิเมตร พบว่าการให้น้ำที่ความดันแตกต่างกันจะสามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดที่ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.025) ในส่วนของแรงดันน้ำ พบว่าแรงดันน้ำที่ 2.00 บาร์ สามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดถึงแม้ว่าจะมีระยะห่างหัวฉีดที่แตกต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.066)

ตาราง 4.3 ค่าตัวกลางขนาดเม็ดฝน ระดับความสูง 200 เซนติเมตรของหัวฉีด 26

แรงดัน (บาร์)	ขนาดเม็ดฝน (มิลลิเมตร) จากระยะห่างหัวฉีดที่ต่างกัน			ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	75 เซนติเมตร	100 เซนติเมตร	125 เซนติเมตร	
1.00	1.400	1.250	1.300	0.076
1.50	1.400	1.125	1.300	0.139
2.00	1.325	1.275	1.375	0.050
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.043	0.080	0.043	

จากตาราง 4.3 หัวฉีด 26 สามารถสร้างเม็ดฝนขนาดตั้งแต่ 1.125 มิลลิเมตรถึง 1.400 มิลลิเมตร พบว่าการให้น้ำที่ความดันแตกต่างกันจะสามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดที่ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตรและ 125 เซนติเมตร (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.043) ในส่วนของแรงดันน้ำ พบว่าแรงดันน้ำที่ 2.00 บาร์สามารถผลิตเม็ดฝนที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดถึงแม้ว่าจะมีระยะห่างหัวฉีดที่แตกต่างกัน (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.050)

จากหัวฉีดทั้ง 3 แบบของเครื่องจำลองน้ำฝนสามารถผลิตเม็ดน้ำขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งหมายถึงสามารถสร้างฝนตกปริมาณน้อยไปถึงระดับฝนตกหนัก

#### 4.2.2 ผลปริมาณน้ำฝนรวมเฉลี่ย

ตามวัตถุประสงค์หลักของโครงการฯ คือการจัดสร้างเครื่องจำลองน้ำฝนขนาดเล็กกะทัดรัดสำหรับการใช้ศึกษาการกษัยการของดิน (Soil Erosion) ซึ่งความสามารถในการกัดเซาะนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดฝน ยิ่งขนาดใหญ่ยิ่งมีอำนาจในการกัดเซาะสูง เพราะจะทำให้มีความเร็วสุดท้ายมากที่สุด และมีความเข้มฝนสูงสุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ระยะห่างของหัวฉีด 75 เซนติเมตรเป็นพื้นฐาน เพราะมีค่าต่างแตกต่างของขนาดเม็ดฝนน้อยที่สุด และกำหนดแรงดันน้ำที่จะผลิตน้ำฝน 2.00 บาร์ เพื่อให้มีปริมาณน้ำฝนในพื้นที่จัดเก็บข้อมูลมากที่สุด และใช้ระยะเวลาเก็บข้อมูล 1 นาทีและจากผลการศึกษาขนาดเม็ดฝนพบว่าแรงดันน้ำที่ 2.00 บาร์สามารถผลิตเม็ดน้ำที่มีความแตกต่างกันน้อยที่สุด จึงนำผลการศึกษานั้นมาใช้ในการกำหนดค่าเริ่มต้นของการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาปริมาณน้ำฝนรวมเฉลี่ยที่เครื่องจำลองน้ำฝนสามารถผลิตปริมาณน้ำได้ ผลจากหาข้อมูลความสูงเฉลี่ยของคนไทยในปัจจุบันพบว่าชายไทยมีความสูงเฉลี่ย 169 ถึง 170 เซนติเมตร คณะทำงานจึงกำหนดความสูงของหัวฉีดน้ำอยู่ระดับตั้งแต่ 125 เซนติเมตรถึง 200 เซนติเมตรจากพื้นดิน เพื่อให้เครื่องจำลองน้ำฝนง่ายต่อการเปลี่ยนหัวฉีดรวมทั้งการทะนุบำรุง ซ่อมแซม วางแผน

จึงกำหนดระดับความสูงของหัวฉีดที่ใช้ในการทดลองไม่เกิน 200 เซนติเมตร ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร ทดลองเก็บข้อมูล 1 นาที จำนวน 6 ครั้ง เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำเพื่อเก็บรวบรวมปริมาณน้ำเฉลี่ยที่หัวฉีดฉีดน้ำในพื้นที่เก็บข้อมูลการทดลอง (2 ตารางเมตร) ดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 4.4 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 015 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างกันและแรงดันน้ำแตกต่างกัน

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิลิตร)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	621.67	543.33	496.67	451.67
1.50	727.50	669.17	598.33	559.17
2.00	949.17	824.17	818.33	755.00

ตาราง 4.5 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 16 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างกันและแรงดันน้ำแตกต่างกัน

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิลิตร)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	3,705.98	3,463.27	2,852.13	2,747.95
1.50	4,498.37	4,123.53	3,502.10	3,262.89
2.00	5,530.85	4,738.52	4,559.20	3,811.73

ตาราง 4.6 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 26 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างกันและแรงดันน้ำแตกต่างกัน

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิลิตร)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	5,535.18	5,122.36	4,477.02	4,222.73
1.50	6,790.40	6,058.90	5,332.29	4,757.24
2.00	7,278.17	6,608.11	5,981.04	5,270.15

ภาพรวมของข้อมูลบ่งชี้ว่าการเพิ่มขนาดของแรงดันน้ำทำให้ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ตกในพื้นที่จัดเก็บข้อมูล (พื้นที่ 2 ตารางเมตร) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการลดลงของระดับความสูงหัวฉีด เมื่อฉีดน้ำด้วยความดันเดียวกัน ณ ระดับหัวฉีดที่ต่ำกว่าจะให้ปริมาณน้ำเฉลี่ยในพื้นที่เพิ่มขึ้น โดยการส่งน้ำแรงดัน 2.00 บาร์ ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร ที่ระดับความสูง 125 เซนติเมตรสามารถให้ปริมาณน้ำเฉลี่ยมากที่สุดในแต่ละหัวฉีด และการส่งน้ำแรงดัน 2.00 บาร์ ของหัวฉีด 26 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตรระดับความสูง 125 เซนติเมตรสามารถให้ปริมาณน้ำเฉลี่ยมากที่สุดของทุกหัวฉีด

เมื่อนำปริมาณน้ำเฉลี่ยจากเครื่องจำลองน้ำฝนเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำฝนตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นในประเทศไทย โดยใช้เกณฑ์การพิจารณาปริมาณฝนในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวันตั้งแต่วันที่ 07.00 น. ของ

วันหนึ่งถึงเวลา 07.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ตามลักษณะของฝนที่ตกในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนย่านมรสุมถูกนำมาใช้ สอบเทียบเครื่องจำลองน้ำฝน โดยใช้ขนาดเม็ดฝน ปริมาณน้ำฝนรวมเฉลี่ย เพื่อคัดเลือกขนาดหัวฉีด ระดับความ สูงของหัวฉีด ระยะห่างหัวฉีดที่เหมาะสม ซึ่งปริมาณฝนที่ตรวจวัดได้ในประเทศเขตร้อนย่านมรสุมคือ

ฝนวัดจำนวนไม่ได้ : ปริมาณฝนน้อยกว่า 0.10 มิลลิเมตรต่อ 24 ชั่วโมง

ฝนเล็กน้อย : ปริมาณฝนระหว่าง 0.10 - 10.00 มิลลิเมตรต่อ 24 ชั่วโมง

ฝนปานกลาง : ปริมาณฝนระหว่าง 10.10- 35.00 มิลลิเมตรต่อ 24 ชั่วโมง

ฝนหนัก : ปริมาณฝนระหว่าง 35.10 - 90.00 มิลลิเมตรต่อ 24 ชั่วโมง

ฝนหนักมาก : ปริมาณฝนตั้งแต่ 90.10 มิลลิเมตรต่อ 24 ชั่วโมงขึ้นไป

และโดยทั่วไปได้จำแนกปริมาณฝนจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมข้อมูลและบันทึกได้ โดยแยกประเภทของฝนดังนี้

ฝนน้อย (Light rain) : ปริมาณฝนน้อยกว่า 2.50 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ฝนปานกลาง (Moderate rain) : ปริมาณฝนระหว่าง 2.50 - 7.60 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ฝนหนัก (Heavy rain) : ปริมาณฝนระหว่าง 7.60 - 10.00 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ฝนหนักมาก (Very heavy rain) : ปริมาณฝนระหว่าง 10.00 - 50.00 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

ฝนหนักรุนแรง (Extreme rain) : ปริมาณฝนมากกว่า 50.00 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

(Wikipedia, 2017)

ปริมาณฝนแท้จริงจากการจัดเก็บได้ ถูกนำมาใช้เปรียบเทียบกับปริมาณฝนของเครื่องจำลองน้ำฝน ดังนี้

ตาราง 4.7 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 015 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างและแรงดันน้ำ แตกต่าง

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	18.65	16.30	14.90	13.55
1.50	21.83	20.08	17.95	16.78
2.00	28.48	24.73	24.55	22.65

ตาราง 4.8 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 16 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างและแรงดันน้ำ แตกต่าง

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	111.18	103.90	85.56	82.44
1.50	134.95	123.71	105.06	97.89
2.00	165.93	142.16	136.78	114.35

ตาราง 4.9 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 26 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. ณ ระดับความสูงแตกต่างกันและแรงดันน้ำแตกต่างกัน

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	166.06	153.67	134.31	126.68
1.50	203.71	181.77	159.97	142.72
2.00	218.35	198.24	179.43	158.10

จากตาราง 4.7 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 015 สร้างปริมาณน้ำฝนได้ในประเภทฝนหนักมาก (Very heavy rain) มีปริมาณฝนระหว่าง 16.00 – 50.00 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงในทุกระดับความดันน้ำและทุกระดับความสูง สำหรับหัวฉีด 16 และหัวฉีด 26 สามารถสร้างปริมาณน้ำฝนได้ในประเภทฝนหนักรุนแรง (Extreme rain) มีปริมาณฝนมากกว่า 50.00 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงในทุกระดับความดันน้ำและทุกระดับความสูง โดยยิ่งระดับแรงดันน้ำมากในระดับความสูงที่ต่ำลง หัวฉีดสามารถสร้างค่าเฉลี่ยน้ำฝนได้มากขึ้น ( ตาราง 4.8 และ 4.9)

เนื่องจากการทดลองนี้เกิดขึ้นภายใต้การควบคุมปัจจัยต่างๆ ทำให้แรงดันน้ำมีผลโดยตรงกับปริมาณน้ำที่หัวฉีดสร้างได้อย่างต่อเนื่องตลอด 1 ชั่วโมง แตกต่างกับปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตามธรรมชาติซึ่งปริมาณน้ำฝนจะตกไม่สม่ำเสมอตลอดระยะเวลา 1 ชั่วโมง คณะทำงานจึงได้นำข้อมูลปริมาณฝนที่ตกหนักตามธรรมชาติของประเทศไทย ในวันที่ 13 กรกฎาคม 2548 ร่องความกดอากาศต่ำหรือร่องฝนกำลังแรงพาดผ่านทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยมีปริมาณฝนสะสมจำนวนมาก ส่งผลให้หลายพื้นที่ในภาคกลางมีฝนตกหนัก โดยมีปริมาณฝนตั้งแต่ 6.50 -26.50 มิลลิเมตรต่อ 15 นาที (คลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศ, 2560)

ตาราง 4.10 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 015 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. เวลา 15 นาที ณ ระดับความสูงแตกต่างกันและแรงดันน้ำแตกต่างกัน

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อ 15 นาที)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	4.66	4.08	3.73	3.39
1.50	5.46	5.02	4.49	4.19
2.00	7.12	6.18	6.14	5.66

ตาราง 4.11 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 16 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. เวลา 15 นาที ณ ระดับความสูงแตกต่าง และแรงดันน้ำแตกต่าง

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อ 15 นาที)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	27.79	25.97	21.39	20.61
1.50	33.74	30.93	26.27	24.47
2.00	41.48	35.54	34.19	28.59

ตาราง 4.12 ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีด 26 ที่ระยะห่างหัวฉีด 75 ซม. เวลา 15 นาที ณ ระดับความสูงแตกต่าง และแรงดันน้ำแตกต่าง

แรงดัน (บาร์)	ปริมาณน้ำเฉลี่ยที่ระดับความสูงแตกต่างกัน (มิลลิเมตรต่อ 15 นาที)			
	125 ซม.	150 ซม.	175 ซม.	200 ซม.
1.00	41.51	38.42	33.58	31.67
1.50	50.93	45.44	39.99	35.68
2.00	54.59	49.56	44.86	39.53

จากผลเปรียบเทียบพบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำของหัวฉีดทั้ง 3 หัวฉีดสามารถสร้างปริมาณน้ำฝนในระยะเวลา 15 นาทีได้ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำฝนตกหนักตามธรรมชาติของประเทศไทยได้

#### 4.2.3 ผลค่าความแตกต่างของการกระจายของน้ำ

The Christiansen Uniformity coefficient (CU) เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการค้นหาค่าความแตกต่างของการกระจายของน้ำที่แพร่หลาย โดยปริมาณดัชนีชี้วัดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เริ่มจาก 0-100 (absolute uniformity) ค่าต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้คือ 80% (Regan, 1987) ซึ่งนักวิชาการบางท่านให้ระดับความน่าพอใจควรจะไม่น้อยกว่า 84% (Keller and Bliesner, 1990; Kara et al., 2008).

ผลการเก็บข้อมูลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อระดับความสูงของหัวฉีดจากพื้นดินเพิ่มขึ้น สำหรับหัวฉีด 16 และหัวฉีด 26 ยกเว้นหัวฉีด 015 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่แน่นอน ซึ่งแสดงในตารางต่อไปนี้

ตาราง 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Christiansen (%) ณ ระดับความสูง 200 เซนติเมตร ความดันน้ำ 2.00 บาร์

ระยะห่างหัวฉีดน้ำ (เซนติเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (%)		
	หัวฉีด 015	หัวฉีด 16	หัวฉีด 26
50	83.42	79.11	94.08
75	41.00	94.96	86.24
100	82.67	79.14	86.40
125	68.37	78.93	81.29

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้คือ 80%

จากตาราง 4.13 ที่แรงดันน้ำ 2.00 บาร์ ระดับความสูง 200 เซนติเมตรค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ดีที่สุดที่หัวฉีด 16 ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร (94.96%) และหัวฉีด 26 ระยะห่างหัวฉีด 50 เซนติเมตร โดยหัวฉีด 015 มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวน้อยที่สุดที่ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตรและ 125 เซนติเมตรตามลำดับ (41.00% และ 68.37%) โดยหัวฉีด 26 มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวยอมรับได้กระยะห่างหัวฉีด

ตาราง 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Christiansen (%) ณ ระดับความสูง 200 เซนติเมตร ความดันน้ำ 1.50 บาร์

ระยะห่างหัวฉีดน้ำ (เซนติเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (%)		
	หัวฉีด 015	หัวฉีด 16	หัวฉีด 26
50	82.62	78.06	91.41
75	68.57	88.68	87.43
100	50.77	76.04	84.41
125	72.62	74.22	76.45

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้คือ 80%

จากตาราง 4.14 ที่แรงดันน้ำ 1.50 บาร์ ระดับความสูง 200 เซนติเมตรค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ดีที่สุดที่หัวฉีด 26 ระยะห่างหัวฉีด 50 เซนติเมตร (91.41%) โดยหัวฉีด 015 มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวน้อยที่สุดที่ระยะห่างหัวฉีด 100 เซนติเมตรและ 75 เซนติเมตรตามลำดับ (68.57% และ 50.77%) โดยหัวฉีด 26 มีค่าการกระจายตัวยอมรับได้ทุกระยะห่างหัวฉีดยกเว้นระยะห่างหัวฉีด 125 เซนติเมตร (76.45%)

ตาราง 4.15 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Christiansen (%) ณ ระดับความสูง 200 เซนติเมตร ความดันน้ำ 1.00 บาร์

ระยะห่างหัวฉีดน้ำ (เซนติเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (%)		
	หัวฉีด 015	หัวฉีด 16	หัวฉีด 26
50	75.74	72.92	84.31
75	73.93	79.74	80.41
100	69.48	65.02	67.30
125	46.63	72.03	45.93

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้คือ 80%

จากตาราง 4.15 ที่แรงดันน้ำ 1.00 บาร์ ระดับความสูง 200 เซนติเมตรค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ดีที่สุดที่หัวฉีด 26 ระยะห่างหัวฉีด 50 เซนติเมตร (84.31%) รองลงมาคือหัวฉีด 26 ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร (80.41%) โดยหัวฉีด 015 และหัวฉีด 16 มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในระดับไม่สามารถยอมรับได้ทุก ระยะห่างหัวฉีด ในขณะที่ระยะห่างหัวฉีด 100 เซนติเมตรและ 125 เซนติเมตรมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวที่ไม่สามารถยอมรับได้ทุกหัวฉีด

ตาราง 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว Christiansen (%) ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร ณ ระดับความดันน้ำ 2.00 บาร์

ระดับความสูง (เซนติเมตร)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (%)		
	หัวฉีด 015	หัวฉีด 16	หัวฉีด 26
125	72.45	82.77	80.47
150	57.36	84.36	82.33
175	72.30	88.67	85.39
200	41.00	94.96	86.24
225	81.26	93.25	90.62
250	90.51	92.89	91.14

หมายเหตุ : ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้คือ 80%

จากตาราง 4.16 ณ ระยะห่างหัวฉีด 75 เซนติเมตร ณ ระดับความดันน้ำ 2 บาร์ของหัวฉีด 16 และหัวฉีด 26 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมากกว่าค่ายอมรับได้ทุกระดับความสูง และจะมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวเพิ่มขึ้นเมื่อระดับหัวฉีดสูงจากระดับพื้นดินเพิ่มขึ้น ยกเว้นหัวฉีด 015