

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย

Effect of Three Vegetations on Rainwater Retention in Extensive Green Roofs:
A Comparative Study

พิมพ์วดี งามศิริ^{a*} และ กันติทัต ทับสุวรรณ^a

Pimwadee Ngamsiri ^{a*} and Kantitut Tubsuwan^a

^aคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประเทศไทย

^aFaculty of Architecture, Kasetsart University, Thailand

*Corresponding Author. Email: pimwadee13@gmail.com

Received: June 18, 2024

Revised: December 13, 2024

Accepted: December 13, 2024

บทคัดย่อ

เป็นหนึ่งในนวัตกรรมอาคารที่มีบทบาทในการบริหารจัดการน้ำฝนอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของพืชพรรณ 3 ประเภท (พืช C3, C4, CAM) ที่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝน ทำการทดลองเชิงปฏิบัติการโดยติดตั้งชุดทดลอง 4 ชุด ได้แก่ กระบะทดลองหลังคาคอนกรีต และกระบะทดลองหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C3 (ถั่วบราซิล), C4 (หญ้ามาเลเชีย) และ CAM (ริบบิ้นชาลี) เปรียบเทียบความสามารถในการชะลอน้ำของชุดทดลองแต่ละชุด โดยใช้วิธีการเก็บข้อมูลน้ำฝนในกรุงเทพฯ ช่วงเดือนกรกฎาคมถึงตุลาคม และแปลงข้อมูลเพื่อจำลองเหตุการณ์ฝนตก และระยะเวลาฝนทิ้งช่วงตามลำดับ ดังนี้ เหตุการณ์ที่ 1 ฝนปานกลาง ระยะเวลา 22 นาที ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 2 วัน, เหตุการณ์ที่ 2 ฝนหนัก ระยะเวลา 100 นาที ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 3 วัน และเหตุการณ์ที่ 3 ฝนปานกลาง ระยะเวลา 26 นาที ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 4 วัน

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืชเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำของหลังคาเขียว โดยพืช C4 มีประสิทธิภาพในการชะลอน้ำฝนดีที่สุด รองลงมาคือพืช C3 และ CAM ในเหตุการณ์ที่ 1 พืช C4 กักเก็บน้ำฝนได้มากที่สุด 77-82% พืช C3 และ CAM กักเก็บน้ำฝนได้ 45-60% และ 27-28% ตามลำดับ ในเหตุการณ์ที่ 2 พืช C4 และ C3 กักเก็บน้ำฝนได้ 9-11% และ 1-6% ตามลำดับ ในขณะที่พืช CAM ไม่สามารถกักเก็บน้ำฝนได้เลย ในเหตุการณ์ที่ 3 พืช C4 กักเก็บน้ำฝนได้มากที่สุด 70-73% พืช CAM และ C3 กักเก็บน้ำฝนได้ 57-64% และ 40-54% ตามลำดับ นอกจากนี้ปัจจัยด้านสภาพอากาศในระหว่างการทดลอง (ความชื้นฝน ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง ข้อมูลด้านสภาพอากาศ) ทำให้พืช C4 มีอัตราการคายน้ำที่ดีที่สุด ซึ่งส่งผลให้มีความต้องการใช้น้ำในกระบวนการเจริญเติบโตมากที่สุดเช่นกัน ประกอบกับลักษณะทางกายภาพของตัวแทนพืช C4 คือหญ้ามาเลเชียซึ่งเป็นพืชคลุมดิน มีความหนาแน่นมาก ใบใหญ่ ทำให้สามารถสกัดกั้นน้ำได้ดีกว่าตัวแทนพืช C3 และ CAM ดังนั้น ในการวิจัยนี้ หญ้ามาเลเชีย (C4) จึงเป็นตัวเลือกที่มีประสิทธิภาพในการชะลอ

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พืชมพู่ดี งามศิริ และ กันติทัต ทับสุวรรณ

การไหลบ่าของน้ำฝนดีที่สุด แต่การนำไปใช้งานควรมีการออกแบบระบบรดน้ำให้เพียงพอกับความต้องการของพืชและควร
เตรียมช่องทางที่สามารถเข้าไปดูแลรักษาพืชพรรณได้อย่างทั่วถึง

ABSTRACT

A green roof is a building innovation that plays a role in sustainable rainwater management. This research aimed to observe the effects of three vegetation (C3, C4, and CAM), which had different photosynthesis processes on rainwater retention efficiency. The operation experiment was conducted by installing four experiment boxes: a concrete roof box and a green roof test box planted with C3 (*Arachis pintoi* Krapov.&W.C.Greg.), C4 (*Axonopus compressus* (Sw.) P.Beauv.), and CAM (*Callisia repens*.) to compare the rainwater retention efficiency. Using methods to collect rainwater data in Bangkok from July to October and transform data to simulate rain events and antecedent dry weather periods (ADWP), respectively. Simulated rain events were conducted as following; Event 1: moderate rain event: 22 min with ADWP 2 days, Event 2: heavy rain event: 100 min with ADWP 3 days, and Event 3: moderate rain event: 26 min with ADWP 4 days.

Findings illustrated the water use efficiency of vegetation was the significant factor affecting the rainwater retention efficiency of green roofs. C4 had excellent rainwater retention efficiency, followed by C3 and CAM. In Event 1, C4 performed the best retention, followed by C3, and CAM (77-82%, 45-60%, and 27-28%), respectively. In Event 2, C4 and C3 retained 9-11% and 1-6% of rainwater, while CAM did not retain rainwater. In addition, in Event 3, C4 still showed the highest retention capacity, followed by CAM, and C3 (70-73%, 57-64%, and 40-54%), respectively. In addition, measured weather data during experiments (Rainfall intensity, antecedent dry weather periods: ADWP, and weather data) contributed significant factors in plants transpiration. As a result, a C4 plant, which has the highest transpiration rate and there is the highest requirement for water in the growth process as well, performed the best rainwater retention. Furthermore, the physical characteristics of C4 as a ground cover crop with high density and large leaves brought better water interception ability than C3 and CAM. Consequently, C4 (*Axonopus compressus* (Sw.) P.Beauv.) was the most efficient vegetation for rainwater retention. However, a sufficient irrigation system and maintenance strategies should be designed before application.

คำสำคัญ: หลังคาเขียว การชะลอการไหลบ่าของน้ำฝน ถั่วบราซิล หญ้ามาเลเชีย ริบบิ้นชาลี

Keywords: Green Roof, Water Retention, C3, C4, CAM

บทนำ

ในช่วงฤดูฝนของทุกปี กรุงเทพมหานครจะต้องเผชิญกับปัญหาน้ำท่วมซึ่งเนื่องจากฝนตกซึ่งมีแนวโน้มที่จะรุนแรงและบ่อยครั้งมากยิ่งขึ้น ส่งผลกระทบต่อการดำเนินชีวิตและสร้างความเดือดร้อนให้แก่ประชาชน ประกอบกับจำนวนประชากรเมืองที่เพิ่มมากขึ้นในทุกปีทำให้เกิดการพัฒนาและการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องมีการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เพื่อรองรับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น ด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลให้พื้นที่สีเขียวหรือพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ในเมืองถูกแทนที่ด้วยสิ่งปลูกสร้างหรือพื้นที่ลาดแข็ง (Impervious surface) การลดลงของพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ทำให้เมื่อฝนตกลงมาน้ำฝนจะไม่สามารถซึมผ่านลงไปในชั้นดินได้จึงเกิดเป็นน้ำที่ไหลบ่า (Water runoff) บริเวณพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวัฏจักรน้ำ (Water cycle) ในพื้นที่เมือง และเมื่อปริมาณน้ำที่ไหลบ่าบริเวณพื้นผิวมากเกินไปความสามารถของระบบระบายน้ำทำให้เกิดน้ำท่วมในพื้นที่เมือง

การลดลงของพื้นที่น้ำซึมผ่านได้ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในหลากหลายมิติ ซึ่งในหลายประเทศทั่วโลกกำลังประสบปัญหานี้เช่นเดียวกันกับประเทศไทย และเพื่อให้การบริหารจัดการน้ำฝนและการพัฒนาเมืองเป็นไปตามเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) ในการยกระดับโครงสร้างพื้นฐานของเมืองให้สามารถส่งเสริมสุขภาวะและรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศได้นั้น (SDGs11 : เมืองและชุมชนที่ยั่งยืน และ SDGs13 : การรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ) จึงได้เกิดแนวคิดในการบริหารจัดการน้ำฝนต่าง ๆ เช่น Low impact development (LIDs), Green infrastructure (GI), Sustainable urban drainage system (SUDs), Water sensitive urban design (WSUD) และ Sponge city เพื่อชะลอ กักเก็บ ป้องกัน และระบายน้ำในหลากหลายรูปแบบ เช่น สวนซับน้ำฝน (Rain garden) บ่อหน่วงน้ำ (Retention pond) พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) และอื่น ๆ แต่รูปแบบดังกล่าวต้องการพื้นที่ว่างบนดินจำนวนมากในการก่อสร้างมีค่าใช้จ่ายสูง และต้องการการดูแลรักษาสูง จึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งานในพื้นที่เมืองที่มีความหนาแน่น ในจำนวนพื้นที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ในเมืองทั้งหมด (Impervious surface) เป็นพื้นที่หลังคาอาคารจำนวนมาก ทำให้หลังคาเขียวจึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการบริหารจัดการน้ำฝนอย่างยั่งยืน และมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ประโยชน์ในเขตเมืองเนื่องจากสามารถติดตั้งบนพื้นที่หลังคาของอาคารได้โดยตรง ช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องของความต้องการพื้นที่ว่างบนดิน นอกจากนี้หลังคาเขียวยังมีประโยชน์ทั้งในระดับอาคาร (หลังคาเรือน) และระดับเมือง (สาธารณะ) เช่น ช่วยเพิ่มพื้นที่สีเขียว สร้างสุขภาवनาสบายภายในอาคาร ลดปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง ปรับปรุงคุณภาพอากาศเพิ่มความหลากหลายของระบบนิเวศ และช่วยลดปริมาณน้ำฝนและปรับปรุงคุณภาพน้ำฝน ด้วยเหตุนี้หลังคาเขียวจึงได้รับความสนใจ มีการศึกษาวิจัย และนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในหลากหลายประเทศทั่วโลก เช่น เยอรมนี สวิตเซอร์แลนด์ ฝรั่งเศส อังกฤษ สหรัฐอเมริกา และสิงคโปร์

โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียวแบ่งได้ 2 ด้าน คือ

- 1) ปัจจัยด้านสภาพอากาศ (Climate variables) เช่น เขตภูมิอากาศ (Climate zone), ฤดูกาล (Season), ความเข้มฝน (Rainfall intensity), ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (Antecedent Dry Weather Period: ADWP)
- 2) ปัจจัยด้านการออกแบบ (Design variables) เช่น ประเภทของหลังคาเขียว (Type of green roof), ชนิดของวัสดุปลูก (Substrate type), ความลึกของวัสดุปลูก (Substrate depth), ประเภทของพืชพรรณ (Vegetation type), ความลาดชันของหลังคา (Roof slope)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ (Akther et al., 2018) พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาประสิทธิภาพการชะลอน้ำฝนของหลังคาเขียวในหลังคาเขียวประเภทไม่ใช้สอย (Extensive green roof) และเมื่อพิจารณาจากการแบ่งเขตภูมิอากาศแบบเคิเปินและไกเกอร์ : Köppen-Geiger climate classification system (Kottek et al., 2006) งานวิจัยส่วนใหญ่ดำเนินการอยู่ใน 2 เขตภูมิอากาศหลัก คือ ภูมิอากาศเขต C (เขตอบอุ่น) และเขต D (เขตกึ่งหนาว) เช่น เยอรมนี สหรัฐอเมริกา แคนาดาฯ (Getter et al., 2007; Locatelli et al., 2014; Mentens et al., 2006; Nagase & Dunnett, 2010, 2012; Stovin et al., 2015; VanWoert et al., 2005) พบงานวิจัยเพียงเล็กน้อยในภูมิอากาศเขต A (เขตร้อน) และเขต B (เขตกึ่งแห้งแล้ง) (Gong et al., 2018; Gong et al., 2021; Liu et al., 2019; Qin et al., 2012; S. Zhang et al., 2021) ซึ่งประเทศไทยอยู่ในเขตภูมิอากาศแบบ Aw (ภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าสะวันนา อบอุ่นชื้นในฤดูร้อน) และ Am (ภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน) ในปัจจุบันงานวิจัยส่วนมากมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับชั้นวัสดุปลูกทำให้งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับชั้นพืชพรรณหรือตัวแปรอื่น ๆ มีจำนวนน้อย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ตั้งของหลังคาเขียวในแต่ละเขตภูมิอากาศร่วมกับปัจจัยต่าง ๆ แล้ว พบว่าประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวอาจจะแตกต่างกันไปเนื่องจากปัจจัยด้านสภาพอากาศและการออกแบบที่แตกต่างกัน ประกอบกับการกระจุกตัวของข้อมูลพื้นที่ศึกษาในบางเขตภูมิอากาศ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมให้ครอบคลุมทั้งปัจจัย วัสดุประสงค์ และเขตภูมิอากาศต่าง ๆ เพื่อนำไปพัฒนาประสิทธิภาพของหลังคาเขียวให้มีความเหมาะสม และรองรับการนำไปใช้งานที่เพิ่มมากขึ้นในแต่ละภูมิภาคทั่วโลก

ในประเทศไทยงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับหลังคาเขียว (Green roof) ส่วนใหญ่จะศึกษาประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย (Extensive green roof) ในชั้นวัสดุปลูก และพืชพรรณ โดยนิยมศึกษาเกี่ยวกับประโยชน์ด้านการลดอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด (เอก ปนาทกุล และ พาสินี สุนากร, 2560; ฐาปกรณ์ สากลปัญญา และ วิรุฬห์ คำชุม, 2564; อธิภัทร จำรัสพันธุ์, 2564; วราวุฒิ ธนาวุฒิวัฒนา, 2552; อนุชา จาเกาะ และคณะ, 2556) มีงานวิจัยเพียงเล็กน้อยที่ศึกษาประโยชน์ของหลังคาเขียวในด้านอื่น ๆ เช่น การลดเสียงรบกวน (กันติทัต ทับสุวรรณ และคณะ, 2562) และการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝน (กนกวลี สุธีธร, 2551; ยิงยศ เงินมาก, 2550)

หลังคาเขียวมีความสามารถในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนได้อย่างมากเมื่อเทียบกับหลังคาทั่วไป โดยในเหตุการณ์ฝนตก 1 เหตุการณ์ น้ำฝนที่ตกลงมาบนหลังคาเขียวส่วนหนึ่งจะถูกดูดซึม (Infiltration) กักเก็บ (Retention) และชะลอ (Delay) ไว้ในชั้นต่าง ๆ เช่น ชั้นวัสดุปลูก ชั้นพืชพรรณ ชั้นระบายน้ำ น้ำฝนส่วนที่เกินความจุจะถูกระบายออกไปยังระบบระบายน้ำ ต่อมาในช่วงที่ไม่มีฝนตกน้ำฝนที่ถูกกักเก็บไว้จะมีการระเหยออกไปหรือถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของพืช เช่น การสังเคราะห์แสง (Photosynthesis), การคายน้ำ (Transpiration) และการคายระเหย (Evapotranspiration) (Dunnett & Kingsbury, 2008)

การเลือกพืชพรรณมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียว (Gong et al., 2021) เช่น ชนิดของพืชพรรณ ความหนาแน่น โครงสร้างของพืช อัตราการคายน้ำ และความสามารถในการใช้น้ำของพืช พืชพรรณแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามกลไกการสังเคราะห์แสงซึ่งแตกต่างกันในขั้นตอนของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ 1) พืช C3 2) พืช C4 3) พืช CAM (Crassulacean acid Metabolism) ซึ่งการสังเคราะห์แสงของพืชส่งผลต่อ

ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืชแต่ละประเภท ประสิทธิภาพการใช้น้ำที่แตกต่างกันของพืชพรรณแต่ละประเภทอาจเป็น
ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนในเหตุการณ์ฝนตกครั้งถัดไป (Z. Zhang et al., 2019)

โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนโดยหลังคาเขียว
แบบไม่ใช้สอย (Extensive green roof) ที่ปลูกด้วยพืชพรรณต่างชนิดกัน โดยทำการสร้างชุดทดลองระบบหลังคาเขียว
ที่ปลูกพืชพรรณที่แตกต่างกัน 3 ประเภท ได้แก่ พืช C3 (ถั่วบราซิล), C4 (หญ้าม้าเลเซีย) และ CAM (ริบบิ้นชาลี) กับ
ชุดทดลองหลังคาคอนกรีตทั่วไปในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานครในช่วงฤดูฝน (กรกฎาคม-ตุลาคม) โดยเก็บข้อมูล
การทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์จำลองเหตุการณ์ฝนตก เปรียบเทียบ และสรุปผล เพื่อให้สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้รับ
ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกพืชพรรณได้อย่างเหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บและชะลอการไหลบ่าของ
น้ำฝนของหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย ส่งเสริมให้เกิดการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย และเป็นทางเลือกในการช่วย
บรรเทาปัญหาน้ำท่วมในเมืองได้อย่างยั่งยืนต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการชะลอน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
(Extensive green roof) ที่ปลูกด้วยพืชพรรณที่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ต่างกัน 3 ประเภท (พืช C3, C4
และ CAM) และหลังคาคอนกรีต ติดตั้งชุดทดลองทั้ง 4 ชุด บริเวณดาดฟ้าชั้น 6 ของอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นตามการแบ่งเขต
ภูมิอากาศแบบเคิเปนและไกเกอร์ (Köppen-Geiger climate classification system) ทำการทดลอง 2 ครั้ง ครั้งละ
15 วัน ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 13-27 ธันวาคม 2566 และครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 5-19 มกราคม 2567 โดยไม่มีการเปลี่ยน
วัสดุปลูก และพืชพรรณในระหว่างการทดลองทั้ง 2 ครั้ง ทำการจำลองเหตุการณ์ฝนตกที่ต่อเนื่องกัน 3 เหตุการณ์
ซึ่งคัดเลือกจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ถูกบันทึกในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึง ตุลาคม 2566 เก็บข้อมูล
การทดลอง และเปรียบเทียบความสามารถในการชะลอน้ำของหลังคาเขียวแต่ละชุดกับชุดทดลองหลังคาคอนกรีต
จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ และเป็นทางเลือกในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 1 รูปแบบของชุดทดลอง

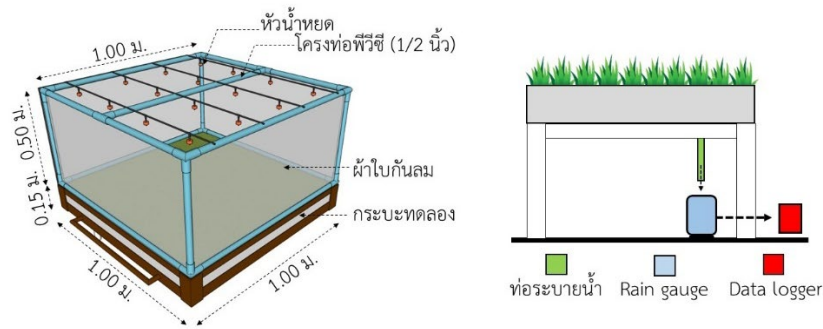
รายละเอียด	ชุดทดลองที่ 1	ชุดทดลองที่ 2	ชุดทดลองที่ 3	ชุดทดลองที่ 4
รูปแบบ	กระบะจำลอง หลังคาคอนกรีต	กระบะทดลอง หลังคาเขียว	กระบะทดลอง หลังคาเขียว	กระบะทดลอง หลังคาเขียว
ประเภทของพืชพรรณ	-	พืช C3	พืช C4	พืช CAM
ชื่อพืชพรรณ	-	ถั่วบราซิล	หญ้าม้าเลเซีย	ริบบิ้นชาลี
ชื่อสามัญ	-	Pinto Peanut	Tropical Carpet	Turtle Vine
ชื่อวิทยาศาสตร์	-	<i>Arachis pintoi</i> Krapov.&W.C.Greg.	<i>Axonopus compressus</i> (Sw.) P.Beauv.	<i>Callisia repens.</i>

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พิมพ์ดีด จามศิริ และ กันติทัต ทัฬหสุวรรณ

รายละเอียด	ชุดทดลองที่ 1	ชุดทดลองที่ 2	ชุดทดลองที่ 3	ชุดทดลองที่ 4
ความต้องการแสงของพืช		แสงแดดปานกลาง- แดดจัด (ฐานข้อมูลเกษตร ดิจิทัล, 2567)	แสงแดดปานกลาง-แดดจัด (Sustainable and Organic Agriculture Program, 2024)	ร่ม-แสงแดดปานกลาง (North Carolina Extension Gardener Plant Toolbox, 2024)

กระบะทดลองขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ลึก 0.15 เมตร ความลาดเอียง 2 องศา เจาะรูระบายน้ำ
สำหรับใส่ท่อระบายน้ำ ก่อนเริ่มการทดลองคณะผู้วิจัยได้คัดเลือกวัสดุปลูกของชุดทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด
โดยคัดเลือกดิน 2 ชนิด ซึ่งพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของดินที่มีขนาดเม็ดดินที่สม่ำเสมอ ร่วนซุย มีคุณสมบัติ
ที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการหาค่าความชื้นในวัสดุปลูก (Moisture content)
และการหาขนาดมวลผลของดิน (Sieve analysis) เพื่อให้ได้วัสดุปลูกที่มีสัดส่วนความเหมาะสมตรงตามมาตรฐาน
ของคู่มือการออกแบบหลังคาเขียวของประเทศเยอรมนี (FLL, 2002) กำหนดความลึกของชั้นวัสดุปลูกเท่ากับ 10
เซนติเมตร ความหนาแน่นของวัสดุปลูกเริ่มต้น 750 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ความชื้นของวัสดุปลูกเริ่มต้น (Moisture
content) ร้อยละ 26.4 ใช้ชั้นวัสดุรอง ชั้นระบายน้ำ และชั้นกันซึมของระบบหลังคาเขียวที่เหมือนกัน ยกเว้น
พืชพรรณที่ปลูกจะแตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง ดังตารางที่ 1 โดยทำการดูแลรดน้ำพืชพรรณให้เจริญเติบโต
ปกคลุมจนเต็มพื้นที่ร้อยละ 100 ของกระบะทดลอง (Coverage Ratio) เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการทดลอง แต่เนื่องจากการ
กำหนดขอบเขตการทดลองคณะผู้วิจัยจึงไม่ได้มีการวัดพื้นที่ใบเพื่อนำมาคำนวณหาดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area
Index-LAI) ในระหว่างการดูแลพืชพรรณคณะผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพอากาศ (Weather Station)
บริเวณที่ตั้งชุดทดลองในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึง ตุลาคม 2566 ระยะเวลา 4 เดือน เพื่อบันทึกข้อมูล
ด้านสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิอากาศ ความชื้น รังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม ทิศทางลม และปริมาณน้ำฝน มาใช้
เป็นข้อมูลในการทดลอง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 1) เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (HOBO Rain Gauge
RG3) 2) เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศและความชื้น (HOBO S-THB-M002-ONSET) 3) เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ (S-LIB-
M003) 4) เครื่องวัดความเร็วลม (S-WSB-M003) 5) เครื่องวัดทิศทางลม (S-WDA-M003) 6) Data Logger (HOBO
H21-USB)

คณะผู้วิจัยได้สร้างอุปกรณ์จำลองน้ำฝน ดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย 1) โครงท่พีวีซีขนาด กว้าง 1 เมตร
ยาว 1 เมตร สูง 0.5 เมตร 2) ระบบหัวน้ำหยดแบบขดเชยแรงดันที่มีอัตราการให้น้ำ 2 ลิตร/ชั่วโมง จำนวน 16 หัว
โดยจะมีอัตราการให้น้ำรวมทั้งหมด 32 ลิตร/ชั่วโมง หรือ 0.533 มิลลิเมตร/นาที่ (เทียบกับพื้นที่กระบะทดลอง
1 ตารางเมตร)



ภาพที่ 1 กระเบื้องทดลองและอุปกรณ์จำลองน้ำฝน

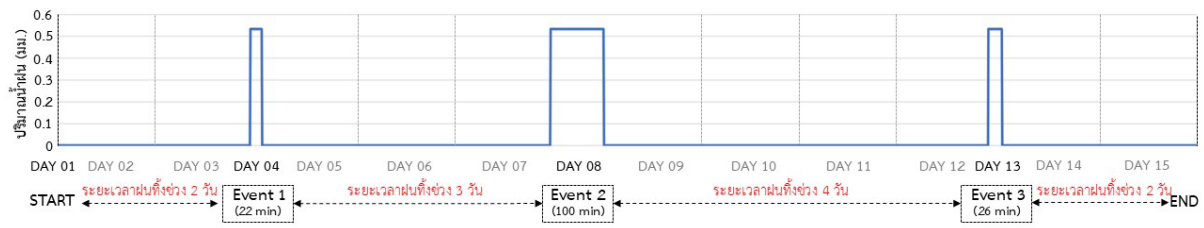
การเก็บข้อมูลการระบายน้ำจากการจำลองน้ำฝนกระทำโดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (Rain gauge) เชื่อมต่อกับ Data logger ติดตั้งไว้บริเวณด้านใต้ท่อระบายน้ำของชุดทดลอง โดยเก็บข้อมูลระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) อัตราการระบายน้ำสูงสุด (flow rate) ปริมาณน้ำที่ระบายออก (Volume) และระยะเวลาในการระบายน้ำทั้งหมด (Total runoff time) เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบความสามารถของพืชพรรณบนหลังคาเขียว แต่ละชนิดและหลังคาคอนกรีตที่มีผลต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝน ข้อมูลเหตุการณ์ฝนตกทั้งหมด ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม ถึง ตุลาคม 2566 สามารถคัดเลือกตัวอย่างเหตุการณ์ฝนตกที่ต่อเนื่องกัน 3 เหตุการณ์ที่นำมาใช้เป็นข้อมูลในการทดลอง โดยใช้เกณฑ์ปริมาณน้ำฝนตามกรมอุตุนิยมวิทยา (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2567) ดังนี้

- 1) เหตุการณ์ที่ 1 (Event 1) ฝนปานกลาง ปริมาณน้ำฝนรวม 11.4 มิลลิเมตร ในวันที่ 2 กรกฎาคม 2566 เวลา 17.33 น. ถึง วันที่ 3 กรกฎาคม 2566 เวลา 02.56 น. รวมระยะเวลา 9 ชั่วโมง 23 นาที
- 2) เหตุการณ์ที่ 2 (Event 2) ฝนหนัก ปริมาณน้ำฝนรวม 53.2 มิลลิเมตร ในวันที่ 5 กรกฎาคม 2566 เวลา 17.37 น. ถึง 19.19 น. รวมระยะเวลา 1 ชั่วโมง 43 นาที ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 62 ชั่วโมง 40 นาที
- 3) เหตุการณ์ที่ 3 (Event 3) ฝนปานกลาง ปริมาณน้ำฝนรวม 13.8 มิลลิเมตร ในวันที่ 9 กรกฎาคม 2566 เวลา 11.48 น. ถึง 12.30 น. รวมระยะเวลา 43 นาที ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 88 ชั่วโมง 28 นาที

การจำลองปริมาณน้ำฝนจะใช้อุปกรณ์จำลองจากหัวน้ำหยดแบบชดเชยแรงดันที่มีอัตราการจ่ายน้ำ 2 ลิตร/ชั่วโมง จำนวน 16 หัว มีอัตราการให้น้ำเทียบเท่า 0.533 มิลลิเมตร/นาที่ ซึ่งสามารถแปลงเหตุการณ์ฝนตกใหม่ โดยอ้างอิงปริมาณน้ำฝนได้ดังนี้

- 1) เริ่มการทดลอง กำหนดให้รดน้ำพืชพรรณที่ปลูกในกระเบื้องทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด ทิ้งทิ้งกระเบื้องปลูกให้วัสดุปลูกถึงจุดอิ่มตัว (Saturation) โดยสังเกตจากน้ำที่ระบายออกมาจากท่อระบายน้ำด้านล่าง
 - 2) ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (ADWP) ช่วงที่ 1 ระยะเวลา 2 วัน
 - 3) เหตุการณ์ที่ 1 (Event 1) ฝนปานกลาง ปริมาณน้ำฝนรวม 11.4 มิลลิเมตร เทียบเท่าการเปิดน้ำ 22 นาที
 - 4) ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (ADWP) ช่วงที่ 2 ระยะเวลา 3 วัน
 - 5) เหตุการณ์ที่ 2 (Event 2) ฝนหนัก ปริมาณน้ำฝนรวม 53.2 มิลลิเมตร เทียบเท่าการเปิดน้ำ 100 นาที
 - 6) ระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (ADWP) ช่วงที่ 3 ระยะเวลา 4 วัน
 - 7) เหตุการณ์ที่ 3 (Event 3) ฝนปานกลาง ปริมาณน้ำฝนรวม 13.8 มิลลิเมตร เทียบเท่าการเปิดน้ำ 26 นาที
- การทดลองใช้ระยะเวลาทั้งหมด 15 วัน จำลองเหตุการณ์ฝนที่ตกต่อเนื่องกัน 3 เหตุการณ์ ดังภาพที่ 2

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พืชมังคุด งามศิริ และ กันตัทิต ทัฬหสุวรรณ



ภาพที่ 2 แผนการทดลอง



ชุดทดลองที่ 1 กระบะทดลองหลังคาคอนกรีต
ชุดทดลองที่ 2 กระบะทดลองหลังคาเขียว พืช C3 (ถั่วบราซิล)
ชุดทดลองที่ 3 กระบะทดลองหลังคาเขียว พืช C4 (หมูมาเลเซีย)
ชุดทดลองที่ 4 กระบะทดลองหลังคาเขียว พืช CAM (ฝรั่งบ้านชาลี)

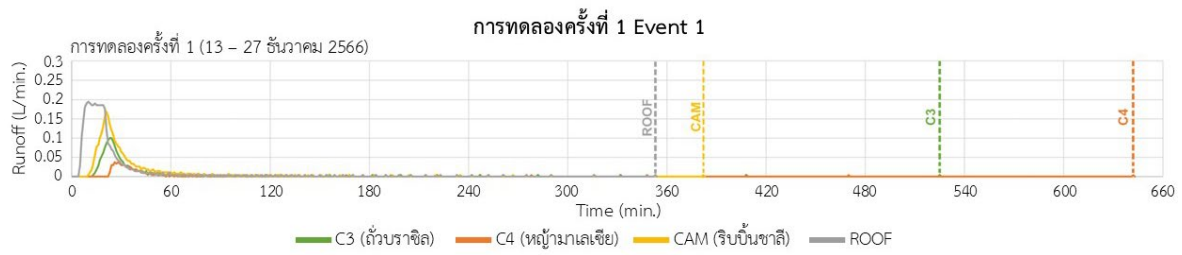
ภาพที่ 3 ชุดทดลองก่อนเริ่มการทดลอง และระหว่างการทดลอง

ผลการทดลอง

การทดลองครั้งที่ 1 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 13-27 ธันวาคม 2566 ระยะเวลารวมทั้งหมด 15 วัน โดยจำลองตัวอย่างเหตุการณ์ฝนตกที่ต่อเนื่องกัน 3 เหตุการณ์ที่คัดเลือกไว้ ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดลองครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 13-27 ธันวาคม 2566 (E1, E2, และ E3 คือ เหตุการณ์ฝนตกที่ 1-3)

ชุดทดลอง	ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (นาท)			อัตราการไหลสูงสุด (มม./นาท)			ระยะเวลาในการระบายน้ำทั้งหมด (นาท)		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Roof	5	5	5	0.195	0.228	0.228	353	423	649
พืช C3	13	11	16	0.100	0.237	0.162	513	971	560
พืช C4	23	11	14	0.037	0.247	0.101	642	798	935
พืช CAM	10	16	22	0.168	0.254	0.206	382	368	267



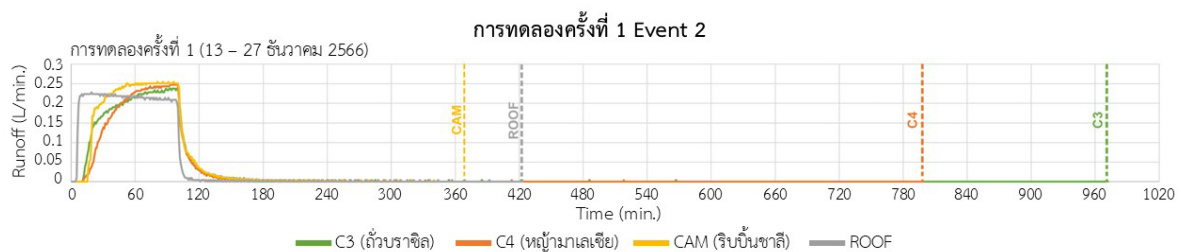
ภาพที่ 4 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 1 Event 1

1) เหตุการณ์ที่ 1 (Event 1) ระยะเวลา 22 นาที ดังภาพที่ 4

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 5 นาที ตามมาด้วยพืช CAM (ริบบิ้นชาลี), พืช C3 (กล้วยบราซิล) และพืช C4 (หญ้ามะลเทศ) มีน้ำเริ่มระบายหลังจากเปิดน้ำ 10 นาที, 13 นาที และ 23 นาที ตามลำดับ

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) สามารถช่วยลดอัตราการระบายน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น ๆ มีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.037 ลิตร/นาที ในขณะที่หลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำมากที่สุดอยู่ที่ 0.195 ลิตร/นาที

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) หลังคาคอนกรีตมีระยะเวลาในการระบายน้ำสั้นที่สุด คือ 353 นาที พืช CAM (ริบบิ้นชาลี) นาน 382 นาที พืช C3 (กล้วยบราซิล) นาน 513 นาที และพืช C4 (หญ้ามะลเทศ) มีระยะเวลาในการระบายน้ำนานที่สุด 642 นาที



ภาพที่ 5 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 1 Event 2

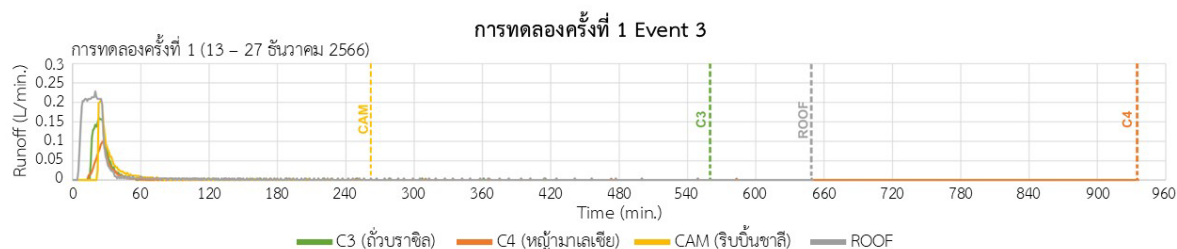
2) เหตุการณ์ที่ 1 (Event 1) ระยะเวลา 22 นาที ดังภาพที่ 4

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 5 นาที ตามมาด้วยพืช CAM (ริบบิ้นชาลี), พืช C3 (กล้วยบราซิล) และพืช C4 (หญ้ามะลเทศ) มีน้ำเริ่มระบายหลังจากเปิดน้ำ 10 นาที, 13 นาที และ 23 นาที ตามลำดับ

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) สามารถช่วยลดอัตราการระบายน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น ๆ มีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.037 ลิตร/นาที ในขณะที่หลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำมากที่สุดอยู่ที่ 0.195 ลิตร/นาที

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พืชมพู่ติ่ง งามศิริ และ กันตัทธิต ทัฬหสุวรรณ

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) หลังคาคอนกรีตมีระยะเวลาในการระบายน้ำสั้นที่สุดคือ 353 นาที พืช CAM (ริบบิ้นขาลี) นาน 382 นาที พืช C3 (ถั่วบราซิล) นาน 513 นาที และพืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) มีระยะเวลาในการระบายน้ำนานที่สุด 642 นาที



ภาพที่ 6 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 1 Event 3

3) เหตุการณ์ที่ 3 (Event 3) ระยะเวลา 26 นาที ดังภาพที่ 6

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 5 นาที ตามมาด้วยพืช C4 (หญ้ามาเลเซีย), พืช C3 (ถั่วบราซิล) และพืช CAM (ริบบิ้นขาลี) มีน้ำเริ่มระบายหลังจากเปิดน้ำ 14 นาที, 16 นาที และ 22 นาที ตามลำดับ

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) พืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) สามารถช่วยลดอัตราการระบายน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น ๆ มีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.101 ลิตร/นาที ในขณะที่หลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำสูงสุดมากที่สุดอยู่ที่ 0.228 ลิตร/นาที

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) พืช CAM (ริบบิ้นขาลี) มีระยะเวลาในการระบายน้ำสั้นที่สุด คือ 267 นาที พืช C3 (ถั่วบราซิล) นาน 560 นาที หลังคาคอนกรีตนาน 353 นาที และพืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) มีระยะเวลาในการระบายน้ำนานมากที่สุด 642 นาที

การทดลองครั้งที่ 2 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 5-19 มกราคม 2567 ระยะเวลาทั้งหมด 15 วัน โดยจำลองตัวอย่างเหตุการณ์ฝนตกที่ต่อเนื่องกัน 3 เหตุการณ์ที่คัดเลือกไว้ ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดลองครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 5-19 มกราคม 2567 (E1, E2, และ E3 คือ เหตุการณ์ฝนตกที่ 1-3)

ชุดทดลอง	ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (นาที)			อัตราการไหลสูงสุด (มม./นาที)			ระยะเวลาในการระบายน้ำทั้งหมด (นาที)		
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3
Roof	4	4	4	0.233	0.233	0.242	395	480	335
พืช C3	9	9	8	0.162	0.242	0.190	802	661	423
พืช C4	16	13	9	0.064	0.243	0.108	772	541	974
พืช CAM	12	13	21	0.228	0.266	0.176	317	407	263



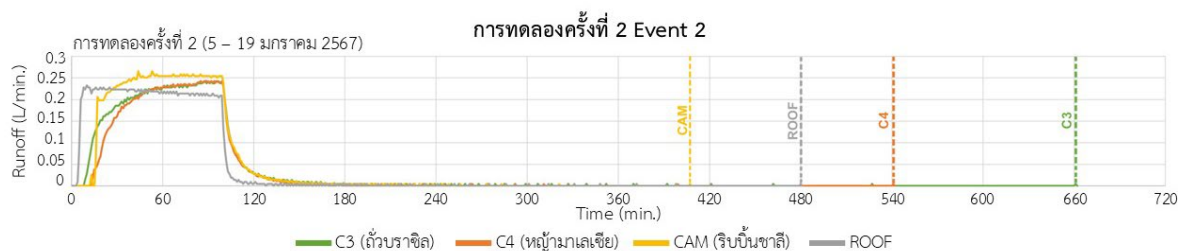
ภาพที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 2 Event 1

1) เหตุการณ์ที่ 1 (Event 1) ระยะเวลา 22 นาที ดังภาพที่ 7

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 4 นาที ตามมาด้วยพืช C3 (กล้วยบราซิล), พืช CAM (ริบบิ้นชาลี) และพืช C4 (หญ้ามะลเทศ) มีน้ำเริ่มระบายหลังจากเปิดน้ำ 9 นาที, 12 นาที และ 16 นาที ตามลำดับ

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) สามารถช่วยลดอัตราการระบายน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น ๆ มีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.064 ลิตร/นาที ในขณะที่หลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำสูงสุดมากที่สุดอยู่ที่ 0.233 ลิตร/นาที

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) พืช CAM (ริบบิ้นชาลี) และหลังคาคอนกรีต มีระยะเวลาใกล้เคียงกันคือ 317 นาที และ 395 นาที ตามลำดับ พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) และพืช C3 (กล้วยบราซิล) มีระยะเวลาใกล้เคียงกันคือ 772 นาที และ 802 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีระยะเวลานานกว่าประมาณ 1 เท่า จากพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) และหลังคาคอนกรีต



ภาพที่ 8 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 2 Event 2

2) เหตุการณ์ที่ 2 (Event 02) ระยะเวลา 100 นาที ดังภาพที่ 8

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 4 นาที ตามมาด้วยพืช C3 (กล้วยบราซิล) 9 นาที พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) และพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) มีระยะเวลาการชะลอการไหลบ่าของน้ำมากที่สุดเท่ากันคือ 13 นาที

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) เมื่อมีระยะเวลาฝนตกที่นานขึ้นชุดทดลองหลังคาเขียวได้รับน้ำจนถึงจุดอิ่มตัว (Saturation) น้ำที่ระบายออกมาจะมีอัตราการระบายน้ำสูงสุดที่ใกล้เคียงกันกับหลังคาคอนกรีต โดยหลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.233 ลิตร/นาที พืช C3 (กล้วยบราซิล) 0.242 ลิตร/นาที พืช C4 (หญ้ามะลเทศ) 0.243 ลิตร/นาที และพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) 0.266 ลิตร/นาที

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พืชมพู่ งามศิริ และ กันติทัต ทับสุวรรณ

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) พืช CAM (ริบบิ้นชาลี) มีระยะเวลาในการระบายน้ำสั้นที่สุด คือ 407 นาที หลังคาคอนกรีตนาน 480 นาที พืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) นาน 541 นาที และพืช C3 (ถั่วบราซิล) มีระยะเวลาในการระบายน้ำนานที่สุด 661 นาที



ภาพที่ 9 แผนภูมิเปรียบเทียบผลการทดลองครั้งที่ 2 Event 3

3) เหตุการณ์ที่ 3 (Event 3) ระยะเวลา 26 นาที ดังภาพที่ 9

- ระยะเวลาในการชะลอน้ำ (Delay) หลังคาคอนกรีตเป็นชุดทดลองที่มีน้ำระบายออกมาเร็วที่สุด คือ 4 นาที ตามมาด้วยพืช C3 (ถั่วบราซิล), พืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) และพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) มีน้ำเริ่มระบายหลังจากเปิดน้ำ 8 นาที, 9 นาที และ 21 นาที ตามลำดับ

- อัตราการระบายน้ำสูงสุด (Flow rate) พืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) สามารถช่วยลดอัตราการระบายน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองอื่น ๆ มีอัตราการระบายน้ำสูงสุดอยู่ที่ 0.108 ลิตร/นาที ในขณะที่หลังคาคอนกรีตมีอัตราการระบายน้ำสูงสุดมากที่สุดอยู่ที่ 0.242 ลิตร/นาที

- ระยะเวลาในการระบายน้ำ (Total runoff time) พืช CAM (ริบบิ้นชาลี) มีระยะเวลาในการระบายน้ำสั้นที่สุด คือ 263 นาที หลังคาคอนกรีตนาน 335 นาที พืช C3 (ถั่วบราซิล) นาน 423 นาที พืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) มีระยะเวลาในการระบายน้ำนานที่สุด 974 นาที

การอภิปรายผล

การการอภิปรายผลการทดลองจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำโดยหลังคาเขียวอย่างรอบด้าน โดยแบ่งเป็นประเด็นต่าง ๆ ดังนี้

1) ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืชพรรณ (Water use efficiency)

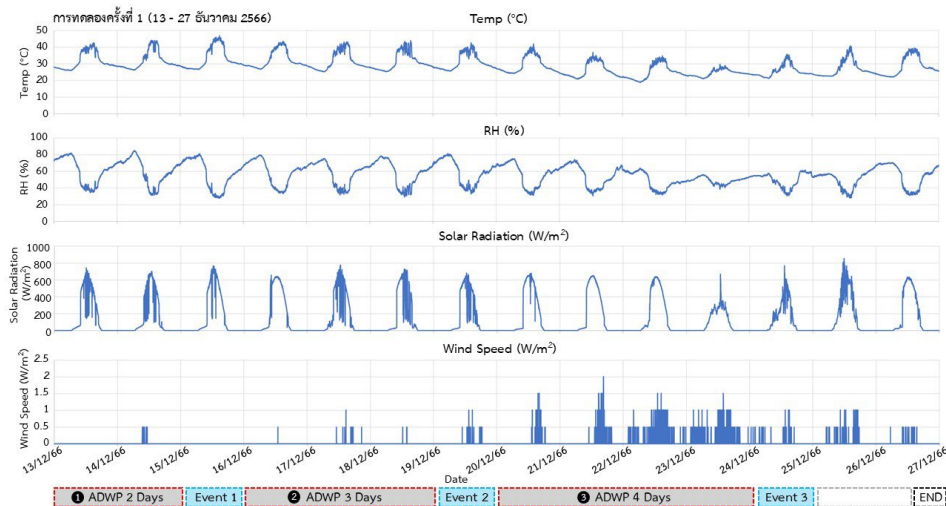
หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 (หญ้ามาเลเซีย) มีประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำมากกว่าหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C3 (ถั่วบราซิล) ในขณะที่หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) มีประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำน้อยที่สุด เนื่องจากพืช C3 และ C4 มีประสิทธิภาพในการใช้น้ำต่ำจึงมีความต้องการใช้น้ำในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ การคายน้ำ และการเจริญเติบโตที่สูงกว่าพืช CAM ทำให้มีปริมาณน้ำในวัสดุปลูกน้อย ส่งผลให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนที่มากกว่าพืช CAM ประกอบกับพืช CAM เป็นพืชที่พบในเขตภูมิอากาศแบบแห้งแล้งซึ่งจะปิดปากใบในตอนกลางวันเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำและจะเปิดปากใบในตอนกลางคืนจึงมีอัตราการคายน้ำที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับพืช C3 และ C4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kemp et al. (2019) ดังนั้นความสามารถในการใช้น้ำของพืชแต่ละประเภทที่มีกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ที่แตกต่างกัน

ในขั้นตอนของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ fixation) มีผลต่อปริมาณน้ำฝนที่กักเก็บไว้ในหลังคาเขียว และปริมาณน้ำฝนที่ระบายออกมาจากหลังคาเขียว พืชพรรณที่มีอัตราการคายน้ำมากจะเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียว ในเหตุการณ์ฝนตกครั้งต่อไป (MacIvor & Lundholm, 2011; Nagase & Dunnett, 2012)

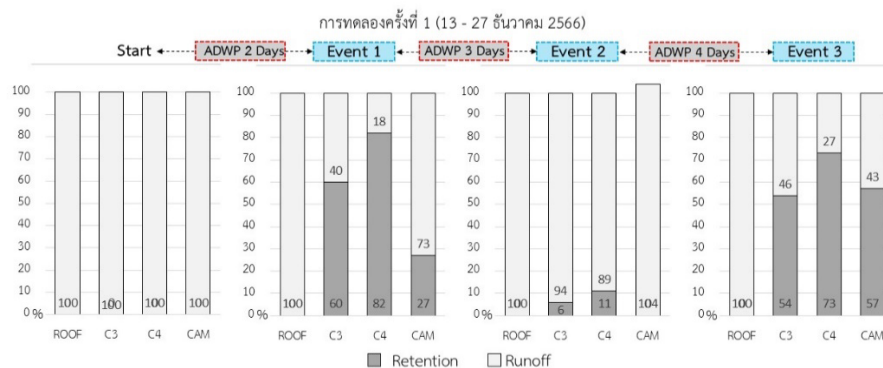
2) ปัจจัยด้านสภาพอากาศ (Climate variables)

ในการทดลองนี้ได้ทำการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพอากาศ (Weather station) เพื่อบันทึกข้อมูลด้านสภาพอากาศตลอดการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีดวงอาทิตย์ และความเร็วลม โดยจะพิจารณาปัจจัยด้านสภาพอากาศเฉพาะในช่วงระยะเวลาฝนทิ้งช่วงในระหว่างเหตุการณ์ฝนตกแต่ละเหตุการณ์

การทดลองครั้งที่ 1 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 13-27 ธันวาคม 2566 มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (ADWP) 3 ช่วง ดังนี้ 1) ช่วงที่ 1 จำนวน 2 วัน ระหว่างวันที่ 14-15 ธันวาคม 66 2) ช่วงที่ 2 จำนวน 3 วัน ระหว่างวันที่ 17-19 ธันวาคม 66 3) ช่วงที่ 3 จำนวน 4 วัน ระหว่างวันที่ 21-24 ธันวาคม 66 ข้อมูลสภาพอากาศ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ข้อมูลสภาพอากาศในระหว่างการทดลองครั้งที่ 1 (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม)



ภาพที่ 11 แผนภูมิเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บน้ำของการทดลองครั้งที่ 1

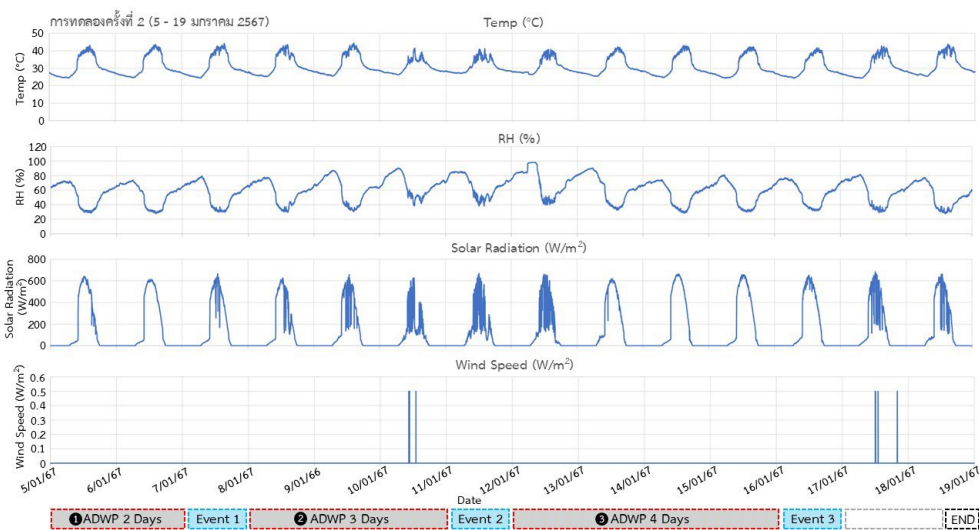
การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พืชมวด ตี๋ งามศิริ และ กันติทัต ทัฬหสุวรรณ

- ใน Event 1 (เทียบเท่าฝนปานกลาง ระยะเวลา 22 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 2 วัน พบว่าหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 กักเก็บน้ำฝนได้ดีที่สุด 82% รองลงมาคือ พืช C3 และพืช CAM กักเก็บน้ำฝนได้ 60% และ 27% ตามลำดับ

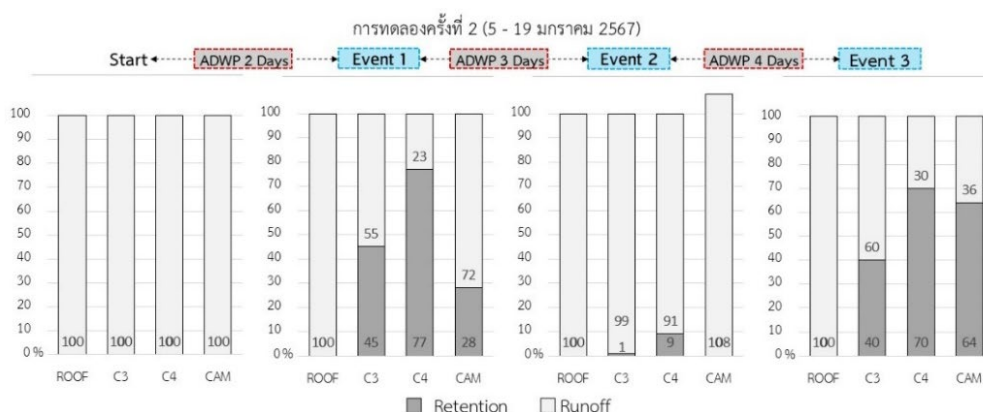
- ใน Event 2 (เทียบเท่าฝนหนัก ระยะเวลา 100 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 3 วัน พบว่าชุดทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด มีความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลงอย่างมาก โดยหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 และพืช C3 สามารถกักเก็บน้ำได้เพียง 11% และ 6% ตามลำดับ ในขณะที่หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช CAM ไม่สามารถกักเก็บน้ำฝนได้เลย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นที่ระบุว่า ความเข้มฝน (Rain intensity) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำฝนของหลังคาเขียว และมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความสามารถในการกักเก็บน้ำฝน (Carter & Rasmussen, 2006; Fioretti et al., 2010; Gong et al., 2018)

- ใน Event 3 (เทียบเท่าฝนปานกลาง ระยะเวลา 26 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 4 วัน พบว่าชุดทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด มีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น โดยหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 กักเก็บน้ำได้ดีที่สุด 73% รองลงมาคือพืช CAM และพืช C3 กักเก็บน้ำได้ 57% และ 54% ตามลำดับ

การทดลองครั้งที่ 2 ทำการทดลองระหว่างวันที่ 5-19 มกราคม 2567 มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง (ADWP) 3 ช่วง ดังนี้ 1) ช่วงที่ 1 จำนวน 2 วัน ระหว่างวันที่ 6-7 มกราคม 67 2) ช่วงที่ 2 จำนวน 3 วัน ระหว่างวันที่ 9-11 มกราคม 67 3) ช่วงที่ 3 จำนวน 4 วัน ระหว่างวันที่ 13-16 มกราคม 67 ข้อมูลสภาพอากาศ ดังภาพที่ 12



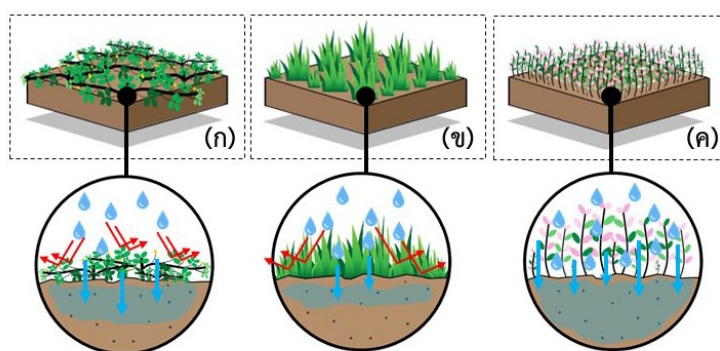
ภาพที่ 12 แสดงข้อมูลสภาพอากาศในระหว่างการทดลองครั้งที่ 2 (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีดวงอาทิตย์ ความเร็วลม)



ภาพที่ 13 แผนภูมิเปรียบเทียบความสามารถในการกักเก็บน้ำของการทดลองครั้งที่ 2

- ใน Event 1 (เทียบเท่าฝนปานกลาง ระยะเวลา 22 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 2 วัน พบว่าหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 กักเก็บน้ำฝนได้ดีที่สุด 77% รองลงมาคือ พืช C3 และพืช CAM สามารถกักเก็บน้ำฝนได้ 45% และ 28%
- ใน Event 2 (เทียบเท่าฝนหนัก ระยะเวลา 100 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 3 วัน พบว่าชุดทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด มีความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลงอย่างมาก โดยหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 และพืช C3 กักเก็บน้ำได้เพียง 9% และ 1% ตามลำดับ ในขณะที่หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช CAM ไม่สามารถกักเก็บน้ำฝนได้เลย
- ใน Event 3 (เทียบเท่าฝนปานกลาง ระยะเวลา 26 นาที) ที่มีระยะเวลาฝนทิ้งช่วง 4 วัน พบว่าชุดทดลองหลังคาเขียวทั้ง 3 ชุด มีความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น โดยหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 กักเก็บน้ำได้ดีที่สุด 70% รองลงมาคือพืช CAM และพืช C3 กักเก็บน้ำได้ 64% และ 40% ตามลำดับ โดยทั่วไปในเหตุการณ์ฝนตกเพียงเล็กน้อยหรือความเข้มฝนต่ำ และมีระยะเวลาฝนทิ้งช่วงที่ยาวนานจะมีแนวโน้มการกักเก็บน้ำฝนได้ดี (Gong et al., 2018)

3) ลักษณะทางกายภาพของพืชพรรณ (Physical characteristics of vegetation)



ภาพที่ 14 แสดงลักษณะทางกายภาพของพืชพรรณ (ก) พืช C3 กล้วยบราซิล (ข) พืช C4 หญ้าม้าเลเชีย (ค) พืช CAM ริบบิ้นชาลี

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C4 (หญ้าม้าเลเชีย) มีประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำดีที่สุด เนื่องจากหญ้าม้าเลเชียเป็นพืชคลุมดิน ลำต้นเลื้อยแตกออกปกคลุมดินได้ดี มีใบขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นสูงทำให้สามารถสกัดกั้นน้ำได้ดีกว่าพืชชนิดอื่น ๆ หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช C3 (กล้วยบราซิล) ถึงแม้จะมีอัตราการคายน้ำที่สูงกว่าพืช C4 (หญ้าม้าเลเชีย) แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพที่เป็นไม้ล้มลุกขนาดเล็ก

ลำต้นทอดเลื้อยคลุมดิน มีใบรูปไข่ ใบย่อย 4 ใบ แต่เนื่องจากถั่วบราซิลมีความหนาแน่นน้อยกว่าหญ้าม้าเลเซียทำให้สามารถกักกั้นน้ำได้น้อยกว่า และมีช่องว่างระหว่างใบมากกว่า น้ำฝนจึงตกลงสู่ชั้นของวัสดุปลูกได้มากกว่าหญ้าม้าเลเซีย หลังคาเขียวที่ปลูกด้วยพืช CAM (ริบบิ้นชาลี) ที่มีประสิทธิภาพในการชะลอน้ำฝนต่ำที่สุด เนื่องจากริบบิ้นชาลี มีลำต้นอวบหนา ใบมีขนาดเล็ก รูปไข่ ในสภาพแวดล้อมที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีจะมีความหนาแน่นมาก แต่เนื่องจากลักษณะลำต้นและใบมีขนาดเล็กมากทำให้สามารถกักกั้นน้ำฝนได้น้อยที่สุด ดังภาพที่ 14 โดย Schrieke and Farrell (2021) ระบุว่าพืชที่มีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วหรือมีใบขนาดใหญ่จะสามารถกักกั้นน้ำได้ดี และการกักกั้นน้ำของพืชพรรณมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของหลังคาเขียว

สรุปผลการวิจัย

การทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า หลังคาเขียวมีประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนได้มากกว่าหลังคาคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mentens et al. (2006) ที่ศึกษาความสามารถในการจัดการน้ำฝนของหลังคาเขียวและหลังคาทั่วไป พบว่าหลังคาเขียวสามารถลดปริมาณการไหลบ่าของน้ำฝนได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาทั่วไป และงานวิจัยของ Musa et al. (2008) ในมาเลเซียที่สรุปว่าอัตราการไหล (Flow rate) และปริมาณการไหลบ่า (Runoff) ของน้ำฝนจากหลังคาเขียวมีค่าต่ำกว่าหลังคาทั่วไป โดยความสามารถในการใช้น้ำของพืชพรรณแต่ละชนิดมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวที่แตกต่างกัน โดยภาพรวมหญ้าม้าเลเซียมีอัตราการชะลอน้ำที่ดีที่สุดในช่วง 9-23 นาที รวมถึงมีระยะเวลาในระบายน้ำนานที่สุดที่ระยะ 541-974 นาที ตามด้วยถั่วบราซิลที่มีอัตราการชะลอน้ำในช่วง 8-16 นาที ระยะเวลาในระบายน้ำที่ 423-971 นาที และพืชที่มีประสิทธิภาพในการชะลอน้ำฝนต่ำที่สุดคือริบบิ้นชาลี ที่มีอัตราการชะลอน้ำในช่วง 12-22 นาที ระยะเวลาในระบายน้ำที่ 263-407 นาที

โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า พืช C3 (ถั่วบราซิล) และพืช C4 (หญ้าม้าเลเซีย) เหมาะสมที่จะนำมาปลูกบนหลังคาเขียวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนได้ดี แต่พืช C3 และ C4 นั้น เป็นพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว และมีความต้องการน้ำในปริมาณมากซึ่งอาจจะเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งานบนหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย ในขณะที่พืช CAM มีประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพืช C3 และพืช C4 แต่หากพิจารณาถึงลักษณะของพืชพรรณ พืช CAM มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาปลูกบนหลังคาเขียวดีที่สุด เนื่องจากเป็นพืชพรรณที่ดูแลรักษาง่าย ต้องการน้ำน้อย ทนทานต่อแสงแดด สามารถอยู่รอดได้ในสภาพแวดล้อมแห้งแล้ง และต้องการดูแลรักษาน้อย การเลือกใช้ประเภทพืชพรรณบนหลังคาเขียวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ ให้รอบด้าน เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง และเป็นทางเลือกในการช่วยบรรเทาปัญหาน้ำท่วมในเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ดังนั้นหากต้องการใช้หลังคาเขียวเพื่อวัตถุประสงค์หลักในการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนควรเลือกใช้พืช C4 ที่มีประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่าของน้ำฝนที่ดีที่สุด แต่ควรมีการออกแบบระบบให้น้ำ (Irrigation system) ให้เพียงพอกับปริมาณน้ำที่พืชต้องการในช่วงฤดูร้อนและควรเตรียมช่องทางที่สามารถเข้าไปบำรุงรักษาพืชพรรณได้อย่างทั่วถึง แต่หากต้องการพืชพรรณที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการปลูกบนหลังคาเขียวควรเลือกใช้พืช CAM

เนื่องจากเป็นพืชชอบน้ำ ต้องการน้ำน้อย ทนทานต่อสภาวะแห้งแล้ง และไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก นอกจากนี้ การนำหลังคาเขียวไปใช้งานยังช่วยส่งเสริมให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ๆ อีกด้วย เช่น การสร้างสภาวะน่าสบายภายในอาคาร การเพิ่มพื้นที่สีเขียว การลดสภาวะเกาะความร้อนในเมือง การปรับปรุงคุณภาพอากาศ และการเพิ่มความหลากหลายของระบบนิเวศ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่มีความหลากหลายและแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงควรทำการศึกษา และทดลองเพิ่มเติมในพืชพรรณที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในระบบหลังคาเขียวชนิดอื่น ๆ เช่น กุหลาบหิน หล่ำนวลน้อย กระดุมทอง หนวดปลาชุก ลั่นทม แคระ สารชะนำ กะเพรา ฯลฯ

เอกสารอ้างอิง

- กนกวลี, สุธีธร. (2551). *หลังคาเขียว: ทางเลือกเพื่อการจัดการน้ำฝน*. Retrieved from <http://www.land.arch.chula.ac.th/pdf/greenroof.pdf>
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2567, 10 ธันวาคม). *เกณฑ์อากาศ*. Retrieved from <https://www.tmd.go.th/info/%E0%B9%80%E0%B8%81%E0%B8%93%E0%B8%91%E0%B8%AD%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A8>
- กันติทัต, ทับสุวรรณ., พาสินี, สุนากร., & ชนิกันต์, ยัมประยูร. (2562). ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิและเสียงรบกวนของระบบหลังคาเขียวบนหลังคาเหล็กที่ดลอน. *ACADEMIC JOURNAL of ARCHITECTURE*, 68, 99-114.
- ฐานข้อมูลเกษตรดิจิทัล. (2567, 12 ธันวาคม). *ฐานข้อมูลพันธุ์ไม้ดอกไม้ประดับ*. Retrieved from <https://data.addrun.org/plant/archives/211-arachis-pintoi-krapov-w-c-greg>
- ฐาปกรณ์, สาภลปัญญา., & วิรุฬห์, คำชุม. (2564). แบบจำลองเพื่อศึกษาความสามารถการเป็นฉนวนกันความร้อนของหลังคาเขียว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 26*, 26.
- ธีรภัทร, จำรัสพันธุ์. (2564). *การเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชคลุมหลังคาสามชนิดต่อสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์บนหลังคา* (ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ยิ่งยศ, เงินมาก. (2550). *การเลือกใช้วัสดุเหลือใช้เพื่อชะลอการไหลของน้ำสำหรับ "หลังคาเขียว"*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Retrieved from https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail?Resolve_Doi=10.14457/CU.the.2007.1123
- วรารุณ, ธนาวิวัฒนา. (2552). *ประสิทธิผลในการใช้หลังคาปลูกต้นไม้เพื่อลดความร้อนสำหรับสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น* (ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- อนุชา, จาเกาะ., พาสินี, สุนากร., ชนิกันต์, ยัมประยูร., & โสภ, วิศิษฐ์ศักดิ์. (2556). สมรรถนะการลดการถ่ายเทความร้อนของแผ่นปลูกพืชบนหลังคา.
- เอก, ปนาทกุล, & พาสินี, สุนากร. (2560). *การพัฒนากระเบื้องหลังคาเขียวที่มีน้ำหนักเบาโดยวิธีให้น้ำใต้ผิว* (วิทยานิพนธ์). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. Retrieved from <https://portal.lib.ku.ac.th/login?url>

=<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat01514a&AN=klc.b1562189&site=eds-live>

- Akther, M., He, J., Chu, A., Huang, J., & Van Duin, B. (2018). A review of green roof applications for managing urban stormwater in different climatic zones. *Sustainability*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082864>
- Carter, T. L., & Rasmussen, T. C. (2006). Hydrologic behavior of vegetated roofs 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(5), 1261-1274.
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting green roofs and living walls*. Timber Press.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8), 1890-1904. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.03.001>
- FLL. (2002). *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.
- Gong, Y., Yin, D., Fang, X., & Li, J. (2018). Factors affecting runoff retention performance of extensive green roofs. *Water*, 10(9), 1217. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/9/1217>
- Gong, Y., Zhang, X., Li, H., Zhang, X., He, S., & Miao, Y. (2021). A comparison of the growth status, rainfall retention and purification effects of four green roof plant species. *Journal of Environmental Management*, 278, 111451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111451>
- Kemp, S., Hadley, P., & Blanuša, T. (2019). The influence of plant type on green roof rainfall retention. *Urban Ecosystems*, 22(2), 355-366. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0822-2>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
- Liu, W., Feng, Q., Chen, W., Wei, W., & Deo, R. C. (2019). The influence of structural factors on stormwater runoff retention of extensive green roofs: new evidence from scale-based models and real experiments. *Journal of Hydrology*, 569, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.066>
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Bergen Jensen, M., & Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*, 519, 3237-3248. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.030>

- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.10.004>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Musa, S., Arish, M., Arshad, N., Jalil, M., Kasmin, H., Ali, Z., & Mansor, M. (2008). Potential of storm water capacity using vegetated roofs in Malaysia. Paper presented at the *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering Practice (ICCE08)*, Kuantan, Pahang, Malaysia.
- Nagase, A., & Dunnett, N. (2010). Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.07.005>
- Nagase, A., & Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104(3), 356-363. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.001>
- North Carolina Extension Gardener Plant Toolbox. (2024, 12 Dec). *Callisia repens*. Retrieved from <https://plants.ces.ncsu.edu/plants/callisia-repens/>
- Qin, X., Wu, X., Chiew, Y.-M., & Li, Y. (2012). A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. *British Journal of Environment and Climate Change*, 2(4), 410.
- Schrieke, D., & Farrell, C. (2021). Trait-based green roof plant selection: Water use and drought response of nine common spontaneous plants. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127368. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127368>
- Stovin, V., Poë, S., De-Ville, S., & Berretta, C. (2015). The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance. *Ecological Engineering*, 85, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.076>
- Sustainable and Organic Agriculture Program. (2024, 12 Dec). *Broadleaf Carpet Grass*. Retrieved from <https://cms.ctahr.hawaii.edu/soap/Resources/Sustainable-and-Organic-Topics/Broadleaf-Carpet-Grass#:~:text=Broadleaf%20carpet%20grass%20is%20a%20short%20perennial>

การศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของพืชพรรณสามชนิดต่อประสิทธิภาพการชะลอการไหลบ่า
ของน้ำฝนโดยหลังคาเขียวแบบไม่ใช้สอย
พิมพ์ดี จามศิริ และ กันติทัต ทับสุวรรณ

%2C,height%20greater%20than%2015%20cm%20%286%20in.%29
%20%28FAO%29

- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., & Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34(3), 1036-1044.
- Zhang, S., Lin, Z., Zhang, S., & Ge, D. (2021). Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations. *Journal of Environmental Management*, 291, 112682. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112682>
- Zhang, Z., Szota, C., Fletcher, T. D., Williams, N. S. G., & Farrell, C. (2019). Green roof storage capacity can be more important than evapotranspiration for retention performance. *Journal of Environmental Management*, 232, 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.070>