สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช และปริมาณรอยเท้าน้ำของกาแฟอะราบิกาในพื้นที่อาศัยน้ำฝน จังหวัดเชียงใหม่

Crop Water Use Coefficient and Water Footprint of Arabica Coffee under Rainfed Condition in Chiang Mai Province

รัฐกร สีบคำ* อนุสรณ์ เทียนศิริฤกษ์ พัชรินทร์ นามวงษ์ ฤทัยรัตน์ ห้อยสัน วุฒิ ศรีวิชัย และสุจิตตรา ปะนันโต

Ratgon Suebkam* Anusorn Tiensiriroek Patcharin Namwong Ruethairat Hoysan Wut Sriwichai and Sujittra Pananto

ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน กรมวิชาการเกษตร อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Khon Kaen Field Crops Research Center, Field and Renewable Energy Crops Research Institute, Department of Agriculture, Muang, Khon Kaen 40000

* Corresponding author: ratgonsuebkam@gmail.com

(Received: 29 August 2024; Revised: 31 October 2024; Accepted: 22 November 2024)

Abstract

The rationale of the research was to study the crop water coefficient of Arabica coffee under rainfed conditions for database not only water management but also water footprint computing for coffee production in Thailand. The results revealed that crop water coefficient of the Catimor coffee cultivar 8 - 9 years on both seasonal (from 1 March 2022 to 28 February 2023 until 1 March 2023 to 29 February 2024) in flowering stage average 0.50±0.40 subsequently fruit development to ripeness stage averaged 1.39±0.01 and harvested until bud formation averaged 0.08±0.08, which have average crop water coefficient whole season and cherry fresh yield were 0.91±0.09 and 2.78±1.54 tons/yielded rai. While the H420 coffee cultivar 6-7 years in flowering stage averaged 0.51±0.37 after that fruit development to ripeness stage averaged 1.53±0.05 and harvested until bud formation averaged 0.05±0.05, which have average crop water coefficient whole season and cherry fresh yield were 0.99±0.10 and 2.41±0.12 tons/rai respectively. For the water footprint amount of the Catimor coffee cultivar such as green, blue, grey, total water footprint and rainfall amount averaged 1,094.2±738.4, 0.0±0.0, 0.9±0.6, 1,095.1±739.1 liters/kilogram and 2,406.5±386.5 mm/crop seasonal whereas the H420 coffee cultivar averaged 1 ,007.2±238.1, 21.4±21.4, 0.2±0.1, 1,028.8±259.4 liters/kilogram and 2 ,627.5±211.9 mm/crop seasonal respectively.

Keywords: Crop water use coefficient, water footprint, Arabica coffee

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟอะราบิกาที่ให้ผลผลิตแล้วในพื้นที่อาศัยน้ำฝน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการให้น้ำ และเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการนำไปคำนวณปริมาณวอเตอร์ฟุตพรินท์ของการผลิตกาแฟในประเทศไทย พบว่า สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์คาติมอร์อายุ 8 - 9 ปี ทั้ง 2 ฤดูกาลเก็บเกี่ยว (ตั้งแต่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2565 ถึง 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 และ 1 มีนาคม พ.ศ. 2566 ถึง 29 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) ในช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.50±0.40 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.39±0.01 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.08±0.08 โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเก็บเกี่ยวและผลผลิตสดเชอร์รี่

เท่ากับ 0.91±0.09 และ 2.78±1.54 ตันต่อไร่ ขณะที่สายพันธุ์ H420 อายุ 6 - 7 ปี ในช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.51±0.37 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.53±0.05 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.05±0.05 โดยมีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเก็บเกี่ยวและผลผลิตสดเชอร์รี่เท่ากับ 0.99±0.10 และ 2.41±0.12 ตัน/ไร่ เนื้อที่ให้ผลตามลำดับ สำหรับปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน สีเทา ปริมาณรอยเท้าน้ำรวมของสายพันธุ์คาติมอร์และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 1,094.2±738.4 0.0±0.0, 0.9±0.6 1,095.1±739.1 ลิตร/กิโลกรัม และ 2,406.5±386.5 มิลลิเมตร/ฤดูกาล ขณะที่สายพันธุ์ H420 ที่มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน สีเทา ปริมาณรอยเท้าน้ำรวมและปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยเท่ากับ 1,007.2±238.2 21.4±21.4 0.2±0.1 1,028.8±259.4 ลิตร/กิโลกรัม และ 2,627.5±211.9 มิลลิเมตร/ฤดูกาลตามลำดับ

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ปริมาณรอยเท้าน้ำ กาแฟอะราบิกา

คำนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีผลผลิตกาแฟ 16,575 ตัน แบ่งเป็นพันธุ์อะราบิกา และโรบัสตา ร้อยละ 48.2 และ 51.8 ตามลำดับ โดยพบว่า การส่งออกกาแฟของประเทศไทยขยายตัวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 สำหรับปี พ.ศ. 2566 ไทยมีมูลค่าการส่งออกกาแฟ 125.89 ล้านเหรียญสหรัฐ โดยแบ่งเป็นการส่งออกในรูปเมล็ดกาแฟดิบ 255.18 ตัน (2.20 ล้านเหรียญสหรัฐ) กาแฟคั่ว 243.23 ตัน (2.75 ล้านเหรียญสหรัฐ) และกาแฟสำเร็จรูป 24,517.72 ตัน (120.95 ล้านเหรียญสหรัฐ) ที่ส่งออกในรูปของกาแฟสำเร็จรูปไปยังประเทศกัมพูชา สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว และฟิลิปปินส์ ตามลำดับ ขณะที่การนำเข้ากาแฟเป็นการนำเข้าเมล็ดกาแฟดิบจากประเทศเวียดนาม อินโดนิเซีย และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว ตามลำดับ พบว่า มีการนำเข้าเมล็ดกาแฟดิบ 62,171.01 ตัน (184.76 ล้านเหรียญสหรัฐ) กาแฟคั่ว 1,647.14 ตัน (27.55 ล้านเหรียญสหรัฐ) และกาแฟสำเร็จรูป 15,947.11 ตัน (126.11 ล้านเหรียญสหรัฐ) ตลาดกาแฟของไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องทั้งการบริโภคในประเทศ และการแปรรูปเพื่อส่งออก ทำให้ความต้องการใช้เมล็ดกาแฟดิบของโรงงานแปรรูปกาแฟในประเทศมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น สำหรับผู้บริโภคทั่วไปนิยมบริโภคกาแฟอะราบิกา เนื่องจากมีความหอม รสชาติดี และปริมาณคาเฟอีนต่ำ ดังนั้น การเพิ่มศักยภาพสำหรับอุตสาหกรรมกาแฟทั้งทางด้านการผลิต และการแปรรูปเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง (Trade Policy and Strategy Office, 2024) ส่งผลทำให้อุตสาหกรรมการผลิตกาแฟมีแนวโน้มการใช้ทรัพยากรน้ำที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ พบว่าปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดต่อผลผลิตเชอร์รี่สดของกาแฟทั่วโลกเฉลี่ย 17,373 ลิตรต่อกิโลกรัม มากกว่าผลผลิตมะพร้าวน้ำหอม และผลผลิตปาล์มสดเฉลี่ย 2,545 และ 1,053 ลิตรต่อกิโลกรัม (Hoekstra and Chapagain, 2008) ในอดีตทรัพยากรน้ำไม่ได้คิดเป็นต้นทุนในการผลิตพืช ผลิตภัณฑ์ และสินค้า แต่ในปัจจุบันทรัพยากรน้ำกำลังขาดแคลนในอนาคตเพราะหลายประเทศกำลังประสบกับภาวะภัยแล้งที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ปริมาณรอยเท้าน้ำเริ่มมีการใช้เป็นเครื่องมือประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมในประเทศเนเธอร์แลนด์ตั้งแต่ พ.ศ. 2545 และได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นทั่วโลกรวมถึงประเทศไทย (Ratthamma, 2012) จากสภาพภูมิอากาศที่มีแนวโน้มอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงฤดูฝนมีปริมาณน้อยสามารถส่งผลกระทบต่อการพัฒนาของผลเชอร์รี่สดของกาแฟ ขณะที่ในช่วงฤดูแล้งถ้ามีปริมาณน้ำฝนตกในพื้นที่สามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณตาดอกของกาแฟอะราบิกาออกอย่างประปราย ให้ผลผลิตต่ำ ยากแก่

การดูแลรักษาและเก็บเกี่ยว เพราะการเจริญเติบโตของตาดอกต้องอาศัยสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงฤดูแล้งประมาณ 2 ถึง 3 เดือน ในการพัฒนาของตาดอกให้สมบูรณ์ (Visser and Mallon, 2021) จากปัญหาดังกล่าวการทราบปริมาณการใช้น้ำของกาแฟอะราบิกาในแต่ละช่วงการเจริญเติบโตจำเป็นต้องใช้ข้อมูลสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการน้ำ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ คือ ศึกษาสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟอะราบิกาที่ให้ผลผลิตแล้วในพื้นที่อาศัยน้ำฝนเป็นข้อมูลพื้นฐาน และการคำนวณปริมาณรอยเท้าน้ำจากความตระหนักเรื่องผลกระทบที่เกิดจากการผลิตกาแฟต่อการใช้ทรัพยากรน้ำเพื่อพัฒนาคุณภาพสู่มาตรฐานสากล (Hoekstra and Hung, 2005; Patthanapichai *et al*., 2019)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. สถานที่และระยะเวลาทำการทดลอง

ทำการทดลองในแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ที่ปลูกกาแฟพันธุ์คาติมอร์อายุ 8 - 9 ปี ที่ระดับความสูงจากน้ำทะเล 1,450 เมตร และแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) ที่ปลูกกาแฟพันธุ์ H420 อายุ 6 - 7 ปี ที่จากระดับความสูงน้ำทะเล 1,288 เมตร ในช่วงมีนาคม พ.ศ. 2565 ถึงกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566 และมีนาคม พ.ศ. 2566 ถึง กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567

2. วางแผนการทดลอง

คัดเลือกต้นกาแฟที่มีอายุ สภาพดิน และสภาพภูมิอากาศที่ใกล้เคียงกัน โดยไม่มีการใส่ตำรับการทดลอง (non-experimental method) ในแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ของกาแฟพันธุ์คาติมอร์ จำนวน 4 ต้น ซึ่ง Highland Research and Development Institute (2015) กล่าวว่า กาแฟพันธุ์คาติมอร์ เป็นสายพันธุ์กาแฟอะราบิกาที่ต้านทานต่อโรคราสนิม ลักษณะทรงต้นเตี้ย ผลผลิตสูง และผลที่สุกแล้วมีสีเหลืองแดงเข้ม หรือสีส้ม ปี พ.ศ. 2525 มีการปลูกทดสอบในแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) จึงเริ่มเป็นที่รู้จักและเผยแพร่ไปยังหน่วยงานรวมทั้งโครงการต่าง ๆ สำหรับแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) ของกาแฟพันธุ์ H420 จำนวน 6 ต้น Department of Agriculture (2019) กล่าวว่า กาแฟพันธุ์ H420 เป็นลูกผสมระหว่างพันธุ์ Mundo Novo 1535/33 กับพันธุ์ H.W. 26/14 (832/1 Hibrio de Timor x 19/1 Caturra) มีลักษณะต้นสูง ปานกลาง ข้อยาวปานกลาง และผลสุกสีแดงตามลำดับ สำหรับข้อมูลสภาพภูมิอากาศมีการเก็บข้อมูลในพื้นที่ ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม และข้อมูลชั่วโมงแสงต่อวันที่ได้จากข้อมูลเว็บไซต์ www.accuweather.com เพื่อคำนวณปริมาณรังสีสุทธิ (Rn) และการคายน้ำของพืชอ้างอิง (ETo) โดยใช้โปรแกรม Cropwat version 8.0 ในการประมวลผลดังแสดง Equation 2

3. วิธีปฏิบัติการทดลอง

3.1 ทำการล้อมต้นกาแฟโดยใช้สังกะสีขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร ฝังที่ระดับความลึกดิน 50 เซนติเมตร เนื่องจากระดับความลึกของรากกาแฟอะราบิกาที่มีประสิทธิภาพควรมีความลึกอย่างน้อย 50 เซนติเมตร โดยพิจารณาจาก ½ ของความยาวรากสูงสุดอย่างน้อย 1 เมตร (Niyibigira, 2019) โดยให้ขอบสังกะสีสูงจากพื้นดิน 10 เซนติเมตร รวมทั้งติดตั้งถังดักน้ำขนาดความจุ 200 ลิตร ฝังลงในดินให้ความสูงของปากถังสูงจากพื้นดิน 10 เซนติเมตร ทำการเจาะรูทางด้านข้างของถังขนาด 2 นิ้ว เพื่อดักน้ำไหลบ่าของดินตลอดจนฝังกระเปราะวัดความชื้นดินทั้ง 2 จุด ที่ระดับความลึกดิน 60 เซนติเมตร เพื่อวัดความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลง โดยเครื่องมือ Prob-meter (PR 2) ที่มีการเก็บข้อมูลทุก ๆ สัปดาห์

3.2 สำหรับสังกะสีที่ล้อมรอบพื้นที่ทรงพุ่มของต้นกาแฟพันธุ์คาติมอร์มีความกว้างและค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error; S.E.) เฉลี่ย 2.16±0.08 เมตร และความยาวเฉลี่ย 3.60±0.14 เมตร

สำหรับต้นกาแฟพันธุ์ H420 มีความกว้างเฉลี่ย 1.64±0.08 เมตร และความยาวเฉลี่ย 2.12±0.26 เมตร

3.3 การคำนวณปริมาณน้ำไหลบ่าของดิน ใช้ไม้วัดความสูงระดับน้ำที่ดักได้ในถังแปลงเป็นหน่วยมิลลิเมตร เพื่อมาคูณกับพื้นที่หน้าตัดของถังที่มีค่าเท่ากับ 0.22 ตารางเมตร ได้ผลลัพธ์เป็นหน่วยลิตร โดยนำผลลัพธ์หน่วยลิตรหารด้วยพื้นที่ทรงพุ่มของต้นกาแฟตารางเมตร เพื่อแปลงเป็นหน่วย มิลลิเมตร/พื้นที่ทรงพุ่ม/สัปดาห์ ทำให้ทราบปริมาณน้ำไหลบ่าผิวดิน (RF) เพื่อนำไปคำนวณในสมการการคายน้ำของพืชแท้จริง (ET_c) ดัง Equation 1 และคำนวณสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (α) ดัง Equation 6.1 เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา (WF_{grey}) ดัง Equation 6

3.4 เก็บความชื้นของดินที่เปลี่ยนแปลงโดยปริมาตรรายสัปดาห์ (θ_v) โดย Prob-meter (PR2) แล้วคูณกับระดับความลึกดิน (SD) ที่มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อสัปดาห์ ดัง Equation 1.4 and 1.5

3.5 ผลผลิตกาแฟ (กิโลกรัม/ไร่ หรือ ตัน/เฮกตาร์) เก็บเกี่ยวผลผลิตเชอร์รี่สดของกาแฟตั้งแต่ปลายมกราคม ถึงปลายกุมภาพันธ์ ชั่งน้ำหนักของผลเชอร์รี่สด/ต้น เนื่องจากระยะปลูกกาแฟของแปลงทดลองมีระยะปลูกที่ไม่ชัดเจน ดังนั้น การคำนวณผลผลิตน้ำหนักสดของผลเชอร์รี่/ไร่ คำนวณจากพื้นที่ให้ผลผลิต 1 ไร่ หารด้วยระยะปลูกกาแฟอะราบิกาที่เหมาะสมคือ 2 x 2 เมตร คิดเป็นจำนวนต้นกาแฟที่ให้ผลผลิต 400 ต้น/พื้นที่ 1 ไร่ (Department of Agriculture, 2019) เพื่อนำไปคำนวณปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว ปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงิน และปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาดัง Equation 4 to 6

3.6 การใส่ปุ๋ยในแปลงทดลองเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ทั้ง 2 ฤดูกาลปลูก ใส่ปุ๋ยเคมีครั้งที่ 1 สูตร 46-0-0 + 15-15-15 อัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 150 กรัม/ต้นในเดือนพฤษภาคม ครั้งที่ 2 สูตร 13-13-21 อัตรา 200 กรัม/ต้นในเดือนสิงหาคม และ ครั้งที่ 3 สูตร 0-0-60 อัตรา 200 กรัม/ต้นในเดือนพฤศจิกายน ปริมาณธาตุอาหาร (N) เท่ากับ 72 กรัมต่อต้น แล้วคำนวณเป็น 28.8 กิโลกรัม (N) /400 ต้น/ไร่ ขณะที่แปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) มีการใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 อัตรา 100 กรัม/ต้นในเดือนกุมภาพันธ์ คิดเป็นปริมาณธาตุอาหาร (N) 15 กรัม/ต้น แล้วคำนวณเป็น 6.0 กิโลกรัม (N)/400 ต้น/ไร่ เพื่อคำนวณ กิโลกรัม/เฮกตาร์ (apply) ของปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา (WF_{grey}) ดัง Equation 6

4. การบันทึกข้อมูล

4.1 เก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพบางประการเช่น เนื้อดิน ความหนาแน่นรวมของดิน ค่าการนำน้ำของดิน และความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินที่ระดับความลึกดิน 0 - 50 เซนติเมตร (Jermsiri, 2003)

4.2 เก็บข้อมูลค่าการคายน้ำแท้จริงของพืช ($ET_{c\text{-}weekly}$) จากสมการสมดุลน้ำดัง Equation 1 (Allen *et al*., 1998)

$$ET_{c\text{-}weekly} = I_{weekly} + P_{weekly} - DP_{weekly} - RF_{weekly} \pm \Delta SW_{weekly} \quad (1)$$

$$DP_{weekly} = P_{weekly} - P_{eff\text{-}weekly} - RF_{weekly} \quad (1.1)$$

$$P_{eff\text{-}daily} = \begin{cases} P \times (125 - (0.2 \times 3 \times P)/125 & \text{When } P \leq 250/3 \quad (1.2) \\ 125/3 + 0.1 \times P & \text{When } P > 250/3 \quad (1.3) \end{cases}$$

$$\Delta SW_{weekly} = \frac{\theta_{mass}\,(\text{after-before}) \times BD_{soil} \times SD}{BD_{water}} \quad (1.4)$$

$$\Delta SW_{weekly} = \theta_{volume}\,(\text{after-before}) \times SD \quad (1.5)$$

$ET_{c\text{-}weekly}$ = ปริมาณการคายน้ำแท้จริงของกาแฟ (มิลลิเมตร/สัปดาห์)

I_{weekly} = ปริมาณน้ำที่ให้ชลประทาน (มิลลิเมตร/สัปดาห์) สำหรับแปลงเกษตรหลวงใหม่ (แม่จอน) มีการให้น้ำชลประทานเดือน มี.ค. พ.ศ. 2565 เฉลี่ย 20.7±2.7 มิลลิเมตร/เดือน และเดือนเมษายน พ.ศ. 2565 เฉลี่ย

21.3±2.1 มิลลิเมตร/เดือน เนื่องจากความชื้นดินในช่วงระยะเวลาดังกล่าวมีความชื้นดินอยู่ในระดับต่ำประกอบกับเพื่อรักษาความสมบูรณ์ของต้นกาแฟก่อนเริ่มต้นการทดลอง

P_{weekly} = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร/สัปดาห์)

$P_{eff\text{-}weekly}$ = ปริมาณน้ำฝนใช้การรายสัปดาห์ (มิลลิเมตร/สัปดาห์) หมายถึง ส่วนของฝนที่ตกลงพื้นที่เพาะปลูกโดยพืชสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ได้คำนวณสมการ USDA Soil Conservation Service (Meteorological Department, 2019; Xu *et al*., 2015) โดยใช้โปรแกรม Cropwat version 8.0 ในการประมวลผล ดัง Equation 1.1 and 1.2

DP_{weekly} = ปริมาณการทราบซึมลึกของน้ำ (มิลลิเมตร/สัปดาห์) ดัง Equation 1.3 (Meteorological Department, 2019)

RF_{weekly} = ปริมาณการไหลบ่าของน้ำผิวดิน (มิลลิเมตร/สัปดาห์), Department of Soil Science (2001)

$\pm \Delta SW_{weekly}$ = ปริมาณน้ำในดินที่เปลี่ยนแปลง (มิลลิเมตร/สัปดาห์)

θ_{mass} = ความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลงโดยน้ำหนัก (กรัม/กรัม)

θ_{volume} = ความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลงโดยปริมาตร (ตารางเซนติเมตร/ตารางเซนติเมตร

BD_{soil} = ความหนาแน่นรวมของดิน (กรัม/ตารางเซนติเมตร)

BD_{water} = ความหนาแน่นรวมของน้ำ (1.004 กรัม/ตารางเซนติเมตร)

SD = ความลึกดิน 500 (มิลลิเมตร)

4.3 เก็บข้อมูลการคายน้ำของพืชอ้างอิงรายวัน ($ET_{o\text{-}daily}$ มิลลิเมตร/วัน) โดยใช้สมการ Penman-Monteith ดัง Equation 2 (Allen *et al*., 1998)

$$ET_{O\text{-}daily} = \frac{0.408\Delta\,(Rn\text{-}G)+\gamma 900/(T+273)U_2\,(es\text{-}ea)}{\Delta+\gamma\,(1+0.34\,U_2)} \quad (2)$$

$ET_{O\text{-}daily}$ = การคายน้ำของพืชอ้างอิง (ETo มิลลิเมตร/วัน)

R_n = ปริมาณรังสีสุทธิ (เมกะจูล/ตารางเมตร/วัน)

G = ค่าความไหลของความร้อนพื้นดิน (เมกะจูล/ตารางเมตร/วัน)

T = อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)

Δ = ค่าความลาดเทของเส้นแรงดันไอ (กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส)

γ = ค่าคงที่ของ psychrometric (กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส)

U_2 = ค่าความเร็วของลม (เมตร/วินาที) และ

$(e_s - e_a)$ = ค่าความต่างของแรงดันไอน้ำ (กิโลปาสคาล)

4.4 คำนวณสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชรายเดือน ($K_{c\ monthly}$) คือสัดส่วนของการคายน้ำของพืชในสภาวะจริงต่อการคายน้ำของพืชอ้างอิงดัง Equation 3 (Allen *et al*., 1998)

$$Kc\ monthly = \frac{ET_{c\text{-}monthly}}{ET_{o\text{-}monthly}} \quad (3)$$

$Kc_{\ monthly}$ = สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช

$ET_{c\text{-}monthly}$ = ปริมาณการคายน้ำของกาแฟ (มิลลิเมตร /เดือน)

$ET_{O\text{-}monthly}$ = การคายน้ำของพืชอ้างอิง (มิลลิเมตร /เดือน)

4.5 ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว (green water footprint) หมายถึง ปริมาณการคายน้ำของพืชหรือปริมาณน้ำฝนที่ถูกใช้ไปเพื่อการเจริญเติบโตของพืชในการให้ผลผลิตดัง Equation 4

$$WF_{green} = \frac{10 \times \text{minimum}\,(ET_{c\text{-}seasonal} \text{ or } P_{eff\text{-}seasonal})}{Y} \quad (4)$$

When $ETc \geq P_{eff}$ using $WF_{green} = P_{eff\text{-}seasonal}$ (4.1)

When $ETc < P_{eff}$ using $WF_{green} = ET_{c\text{-}seasonal}$ (4.2)

WF_{green} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

$P_{eff\text{-}seasonal}$ = ปริมาณน้ำฝนทำการในตลอดฤดูกาลให้ผลผลิตพืช (มิลลิเมตร)

$ET_{c\text{-}seasonal}$ = การคายน้ำของพืชตลอดฤดูกาลให้ผลผลิตพืช (มิลลิเมตร)

Y = ผลผลิตของพืช (ตัน/เฮกตาร์) และ 10 = ค่าการกลับหน่วยจาก (มิลลิเมตร) เป็น (ลูกบาศก์เมตร/เฮกตาร์) (Babel *et al*., 2011)

4.6 ปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงิน (blue water footprint) คือ ปริมาณน้ำชลประทานที่ให้กับพืชดัง Equation 5

$$WF_{blue} = \frac{10 \times \text{maximum}\ (0 \text{ or } I_{seasonal})}{Y} \quad (5)$$

When $I_{seasonal} \geq 0$ using $WF_{blue} = I_{seasonal}$ (5.1)

WF_{blue} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

$I_{seasonal}$ = ปริมาณน้ำชลประทานที่ให้กับพืช (มิลลิเมตร)

Y = ผลผลิตของพืช (ตัน/เฮกตาร์) และ 10 = ค่าการกลับหน่วยจาก (มิลลิเมตร) เป็น (ลูกบาศร์เมตร/เฮกตาร์) (Babel *et al*., 2011)

4.7 ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา (grey water footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากการปลูกพืชโดยพิจารณาปริมาณไนเตรท (NO_3^-) ที่สูญเสียไปกับปริมาณการให้น้ำชลประทานโดยมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนให้กับพืชให้กลายเป็นน้ำดีตามค่ามาตรฐานของแต่ละประเทศเพราะไนเตรทเป็นสาเหตุของโรคมะเร็ง (Picetti *et al*., 2022) ดัง Equation 6

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times apply)/(C_{max}-C_{nat})}{Y} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{DP_{seasonal} + RF_{seasonal}}{P_{seasonal} + I_{seasonal}} \quad (6.1)$$

WF_{grey} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

α = สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ คือสัดส่วนของการระบายน้ำของดินในรูปไหลบ่าผิวดินและซาบซึมลึกหารด้วยผลบวกของปริมาณน้ำฝนและปริมาณน้ำชลประทานที่ให้กับพืช

apply = อัตราการใส่ปุ๋ยเคมีไนโตรเจน (กิโลกรัม/เฮกตาร์)

C_{max} = มาตรฐานของน้ำดื่มที่ให้มีไนเตรทปนเปื้อนสำหรับมาตรฐานยุโรปได้ไม่เกิน 10 (มิลลิกรัม/ลิตร)

C_{nat} = การปนเปื้อนของไนเตรทในแหล่งน้ำตามธรรมชาติสำหรับมาตรฐานยุโรปมีค่าเท่ากับ 0.2 (มิลลิกรัม /ลิตร)

$DP_{seasonal}$ = การระบายของน้ำในดินในรูปซาบซึมลึก (มิลลิเมตร)

$RF_{seasonal}$ = ไหลบ่าผิวดิน (มิลลิเมตร)

$P_{seasonal}$ = ปริมาณน้ำฝนตลอดฤดูกาลให้ผลผลิตพืช (มิลลิเมตร)

$I_{seasonal}$ = ปริมาณน้ำชลประทานที่ให้กับพืช (มิลลิเมตร)

Y = ผลผลิตของพืช (ตัน/เฮกตาร์) (Chapagain *et al*., 2009; Liu *et al*., 2012; Sun *et al*., 2010)

4.8 ปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดคือผลรวมของปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงิน ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียวและปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาดัง Equation 7

$$WF_{TOTAL} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (7)$$

WF_{Total} = ปริมาณรอยเท้าน้ำรวม (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

WF_{green} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

WF_{blue} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

WF_{grey} = ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา (ลูกบาศก์เมตร/ตัน หรือ ลิตร/กิโลกรัม)

(Babel *et al*., 2011)

ผลการวิจัยและวิจารณ์

1. สภาพดินและภูมิอากาศ

สมบัติทางกายภาพของดินก่อนทำการทดลองในแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ที่ระดับความลึกของดิน 0 - 50 เซนติเมตร พบว่า เป็นดินร่วนทราย มีลักษณะเป็นดินเนื้อหยาบที่ระดับความลึกดิน 20 - 30 เซนติเมตร ขณะที่ระดับความลึกดิน 0 - 20 เซนติเมตร และ 30 - 50 เซนติเมตร เป็นดินร่วนปนเหนียวปนทราย ถึงดินร่วนที่มีลักษณะเป็นเนื้อดินปานกลางมีความหนาแน่นรวมของดินเฉลี่ย 1.15±0.02 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการนำน้ำของดินเฉลี่ย 1.58±0.38 เซนติเมตร/ชั่วโมง และความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินทั้งหมด 43.47 มิลลิเมตร สำหรับแปลงการทดลองเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) พบว่า เป็นดินร่วนทราย มีลักษณะเป็นดินเนื้อหยาบที่ระดับความลึกดิน 10 - 40 เซนติเมตร ถึงดินร่วนปนเหนียวปนทรายมีลักษณะเนื้อดินปานกลาง และดินเหนียวปนทรายมีลักษณะเนื้อดินละเอียดที่ระดับความลึกดิน 0 - 10 และ 40 - 50 เซนติเมตร มีความหนาแน่นรวมของดินเฉลี่ย 1.42±0.06 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการนำน้ำของดินเฉลี่ย 4.22±1.67 เซนติเมตร/ชั่วโมง และความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินทั้งหมด 31.05 มิลลิเมตรตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าแปลงทดลองของเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) มีการระบายน้ำของดินดีกว่าแปลงทดลองเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) เนื่องจากที่ระดับความลึกดิน 10 - 40 เซนติเมตร เป็นดินร่วนปนทราย มีลักษณะเนื้อดินหยาบส่งผลทำให้ค่าการนำน้ำของดินมากกว่าแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) เป็นดินร่วนปนทรายแค่เพียงที่ระดับความลึกดิน 20 - 30 เซนติเมตร ขณะที่ความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินที่ระดับความลึกดิน 0 - 50 เซนติเมตร น้อยกว่าแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) Department of Agriculture (2019) การปลูกกาแฟอะราบิกาควรมีชั้นดินลึกไม่ต่ำกว่า 50 เซนติเมตร และมีการระบายน้ำที่ดี สอดคล้องกับ Arphasiripon (1986) กล่าวว่า กาแฟอะราบิกามีความต้องการดินที่มีการระบายน้ำที่ดี เพราะรากแขนงและรากฝอยของกาแฟอะราบิกามีการเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับความลึกดิน 0 -30 เซนติเมตร ขณะที่ Niyibigira (2019) กล่าวว่าระดับความลึกของรากที่มีประสิทธิภาพของกาแฟอะราบิกาควรมีความลึกอย่างน้อย 50 เซนติเมตร โดยพิจารณาจากค่า ½ ของความยาวรากสูงสุดควรมีความลึกของรากอย่างน้อย 1 ม. คล้อยคลึงกับ Allen *et al*. (1998) กล่าวว่า ความยาวรากสูงสุดของกาแฟทุกพันธุ์อยู่ในช่วง 0.9 ถึง 1.5 เมตร ขึ้นอยู่กับว่ามีชั้นดานของดินที่ระดับความลึกดินหรือไม่

สำหรับสภาพภูมิอากาศในแปลงทดลอง ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด - ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน เพื่อคำนวณปริมาณรังสีสุทธิ (Rn) และปริมาณการคายน้ำของพืชอ้างอิง (ETo) ของแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวางและแม่จอน) ทั้ง 2 ช่วงฤดูกาลปลูก พบว่า อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 26.3±0.7 และ 21.7±1.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 16.2±0.7 และ 17.3±0.5 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 85.0±2.7 และ 86.1±1.7 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วลมเฉลี่ย 0.83±0.26 และ 1.78±0.20 เมตร/วินาที ปริมาณรังสีสุทธิ (Rn) เฉลี่ย 16.7±0.8 และ 17.8±1.0 เมกะจูล/ตารางเมตร/วัน การคายน้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) รวม

ทั้งหมดเท่ากับ 1,134.8 และ 1,144.4 มิลลิเมตร/ฤดูกาล รวมทั้งปริมาณน้ำฝนตกในพื้นที่เท่ากับ 2,792.9 และ 2,020.0 มิลลิเมตร/ฤดูกาล คิดเป็นน้ำฝนใช้การ (P_{eff}) 1,117.7 และ 907.0 มิลลิเมตร/ฤดูกาลตามลำดับ Figure 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแปลงทดลองเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) ที่มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 26.2±0.7 และ 25.2±0.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 15.3±1.1 และ 15.8±0.9 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 86.3±1.4 และ 85.8±2.3 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วลมเฉลี่ย 0.50±0.08 และ 0.92±0.09 ม./วินาที ปริมาณรังสีสุทธิที่ตกกระทบพื้นดิน (Rn) 16.6±0.8 และ 18.0±1.1 เมกะจูล/$ม^2$./วัน การคายน้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) รวมทั้งหมดเท่ากับ 1,117.3 และ 1,171.7 มิลลิเมตร/ฤดูกาล รวมทั้งปริมาณน้ำฝนตกในพื้นที่เท่ากับ 2,839.3 และ 2,415.6 มิลลิเมตร/ฤดูกาล คิดเป็นน้ำฝนใช้การ (P_{eff}) 1,197.5 และ 942.5 มิลลิเมตร/ฤดูกาลตามลำดับ Figure 2

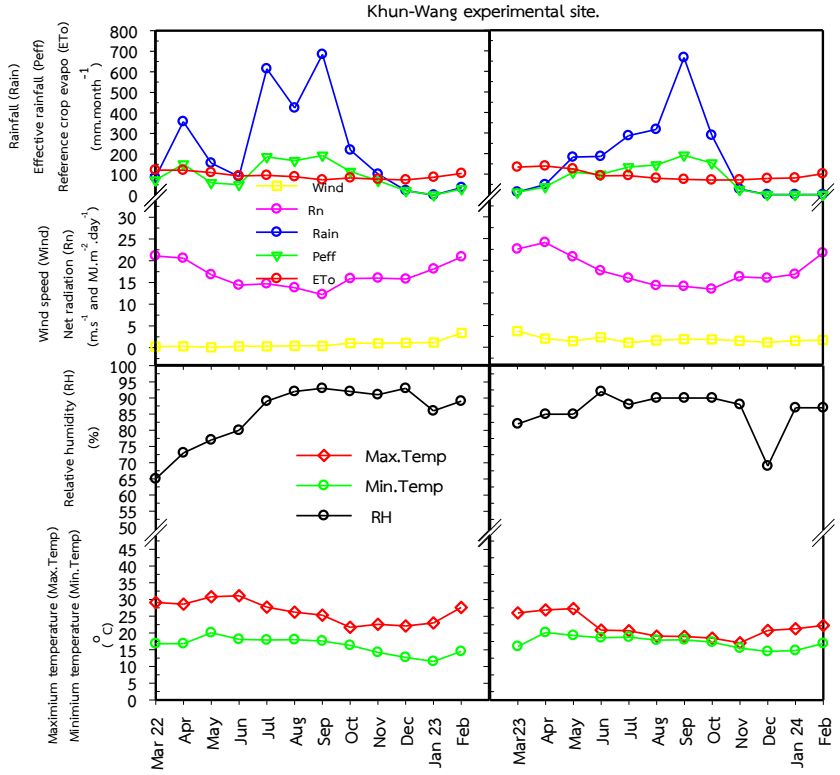

Figure 1 Weather data collected of Khun-Wang agricultural experiment center at msl 1,450 meters

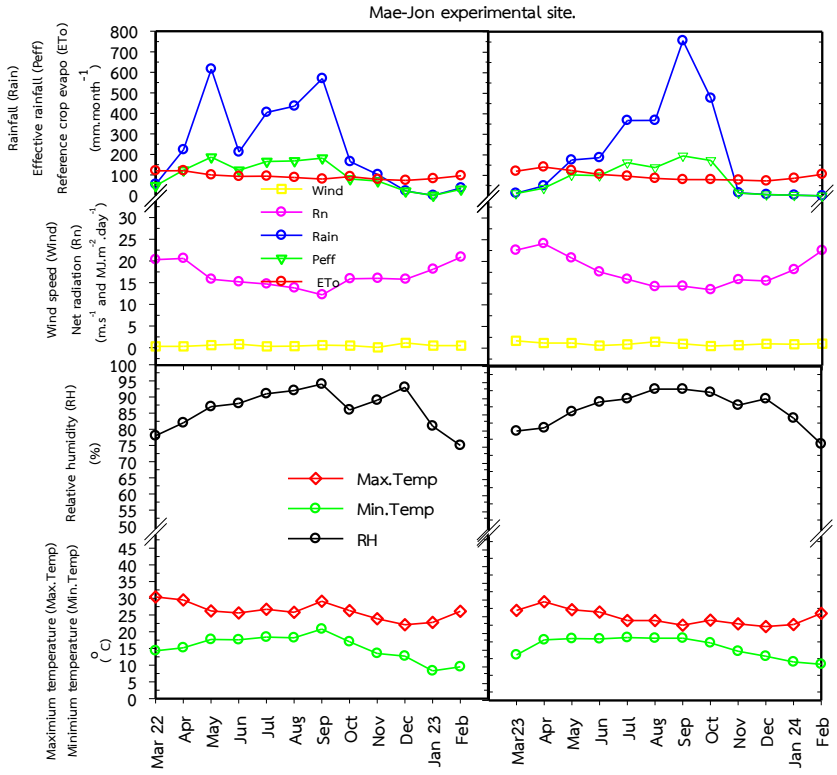

Figure 2 Weather data collected of Mae-Jon agricultural experiment center at msl 1,288 meters

จากข้อมูลดังกล่าวว่า พบว่า ฤดูกาลปลูกทั้ง 2 ฤดูกาลปลูก (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) ทั้งแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวางและแม่จอน) อุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง 21.7 ถึง 26.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดอยู่ในช่วง 15.3 ถึง 17.3 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 85.0 ถึง 86.3 เปอร์เซ็นต์ เป็นสภาพที่เหมาะสมสำหรับการปลูกกาแฟอะราบิกา Haggar and Schepp (2012) กล่าวว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกาแฟอะราบิกาอยู่ในช่วง 14 - 28 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับ Department of Agriculture (2019) กล่าวว่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 15 - 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณน้ำฝนในช่วงฤดูกาลปลูกครั้งที่ 1 (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566) ทั้งแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวางและแม่จอน) อยู่ในช่วง 2,792.9 ถึง 2,839.3 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก มากกว่าปริมาณน้ำฝนแนะนำที่ตกในพื้นที่ สำหรับฤดูกาลปลูกครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) มีปริมาณน้ำฝนอยู่ในช่วง 2,020.0 ถึง 2,415.6 มิลลิเมตร/ฤดูกาล เป็นปริมาณน้ำฝนที่ตกพอเหมาะในพื้นที่ เมื่อเปรียบเทียบกับ Haggar and Schepp (2012) กล่าวว่า ปริมาณน้ำฝนที่ตกในพื้นที่ควรอยู่ในช่วง 1,400 - 2,400 มิลลิเมตร/ฤดูกาล สอดคล้องกับ Willson (1985) กล่าวว่าปริมาณน้ำฝนควรอยู่ในช่วง 1,750 - 2,000 มิลลิเมตร/ฤดูกาล ช่วงระยะเวลาในการกระจายตัวของฝนควรนานถึง 9 เดือน ส่วนอีก 3 เดือนควรเป็นหน้าแล้งซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดตาดอกของกาแฟ สอดคล้องกับ Visser and Mallon (2021) กล่าวว่าปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-กันยายน) ถ้ามีปริมาณน้อยสามารถส่งผลกระทบต่อการพัฒนาของผลเชอร์รี่สดของกาแฟได้ ขณะที่ในช่วงฤดูแล้ง (ธันวาคม-กุมภาพันธ์) ถ้ามีปริมาณน้ำฝนตกในพื้นที่สามารถส่งผลกระทบต่อ

ปริมาณตาดอกออกอย่างประปราย ให้ผลผลิตต่ำ ยากแก่การดูแลรักษาและเก็บเกี่ยว เพราะการเจริญเติบโตของตาดอกต้องอาศัยสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงฤดูแล้ง สอดคล้องกับ Department of Agriculture (2019) กล่าวว่าควรมีปริมาณน้ำฝนไม่ต่ำกว่า 1,500 มิลลิเมตรต่อปี และต้องมีการกระจายน้ำฝนอย่างน้อย 5 - 8 เดือน

2. การคายน้ำและสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟอะราบิกา

การคายน้ำแท้จริง (ET_c) ของกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์คาติมอร์ในแปลงเกษตรหลวงขุนวางช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566) ในช่วงระยะดอกบาน (มีนาคม-เมษายน) มีค่าเฉลี่ย 108.7±43.1 มิลลิเมตร/เดือน ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผล (พฤษภาคม-พฤศจิกายน) เฉลี่ย 121.1±23.4 มิลลิเมตร/เดือน และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอก (ธันวาคม-กุมภาพันธ์) เฉลี่ย 13.8±8.5 มิลลิเมตรต่อเดือน ที่มีค่าการคายน้ำน้ำแท้จริง (ETc) ตลอดฤดูกาลปลูก 1,106.5 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Kc) ในช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 ของช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.90±0.36 ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 1.39±0.29 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย 0.15 ± 0.08 มม./มม./เดือน ทั้งตลอดฤดูกาลปลูกครั้งที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเฉลี่ย 1.00±0.23 สำหรับช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) ค่าการคายน้ำของพืชแท้จริง (ET_c) ในช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 13.5±10.8 มิลลิเมตร/เดือน ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 116.6±21.9 มิลลิเมตร/เดือน และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย 0.00 ± 0.00 มิลลิเมตร/เดือน ที่มีค่าการคายน้ำน้ำแท้จริง (ETc) ตลอดฤดูกาลปลูก 843.3 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ในช่วงระยะดอกบานเฉลี่ย 0.10±0.08 ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 1.38±0.30 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย 0.00±0.00 มม./มม./เดือน ทั้งตลอดฤดูกาลปลูกครั้งที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเฉลี่ยเท่ากับ 0.82±0.26 ดัง Figure 3 สำหรับแปลงเกษตรหลวงแม่จอนที่ปลูกกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์ H420 ช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 ในช่วงระยะดอกบาน (มีนาคม-เมษายน) มีค่าเฉลี่ย 102.4±47.2 มิลลิเมตร/เดือน ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผล (พฤษภาคม-พฤศจิกายน) เฉลี่ย 140.1±19.7 มิลลิเมตร/เดือน และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอก (ธันวาคม-กุมภาพันธ์) เฉลี่ย 9.3±9.3 มิลลิเมตร/เดือน ที่มีค่าการคายน้ำน้ำแท้จริง (ETc) ตลอดฤดูกาลปลูก 1,213.5 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Kc) ในช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 ของช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.85±0.39 ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 1.57±0.22 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย 0.10±0.10 มม./มม./เดือน ทั้งตลอดฤดูกาลปลูกครั้งที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเฉลี่ย 1.08±0.23 สำหรับช่วงเก็บเกี่ยวผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) มีค่าการคายน้ำของพืชแท้จริง (ET_c) ในช่วงระยะดอกบานเฉลี่ย 23.7±18.4 มิลลิเมตร/เดือน ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 135.3±24.5 มิลลิเมตร/เดือน และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย 0.00±0.00 มิลลิเมตร/เดือน ที่มีค่าการคายน้ำน้ำแท้จริง (ETc) ตลอดฤดูกาลปลูก 994.2 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก ตามลำดับ สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (Kc) ในช่วงระยะดอกบานเฉลี่ย 0.17±0.13 ตามด้วยระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลเฉลี่ย 1.48±0.30 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกเฉลี่ย

0.00±0.00 ทั้งตลอดฤดูกาลปลูกครั้งที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเฉลี่ย 0.89±0.27 ดัง Figure 4

จากข้อมูลดังกล่าวค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟคาติมอร์ของเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ตลอดฤดูกาลปลูกทั้ง 2 มีค่าเฉลี่ย 1.00±0.23 และ 0.82±0.26 ขณะที่สัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟ H420 ของเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) มีค่าเฉลี่ย 1.08±0.23 และ 0.89±0.27 มีค่าใกล้เคียงกับ Allen *et al*. (1988) รายงานค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟที่ไม่มีวัชพืชปกคลุมในพื้นที่ตลอดฤดูกาลเก็บเกี่ยวอยู่ในช่วง 0.90 ถึง 0.95 และสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟที่มีวัชพืชปกคลุมในพื้นที่อยู่ในช่วง 1.05 ถึง 1.10 สอดคล้องกับ Doorenbos and Pruitt (1977) และ Silva *et al*. (2008) ได้มีการศึกษาสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟอะราบิกาอายุ 3 ถึง 5 ปี มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำตลอดฤดูกาลเก็บเกี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 1.10 สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของกาแฟในช่วงระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอก (ธันวาคม - กุมภาพันธ์) ของแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ทั้ง 2 ฤดูกาลปลูกมีค่าเฉลี่ย 0.15±0.08 และ 0.00±0.00 สอดคล้องกับแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) มีค่าเฉลี่ย 0.10±0.10 และ 0.00±0.00 Thongaram *et al*. (1999) กล่าวว่าสำหรับระยะการสร้างตาดอก (flowering bud formation) ต้องผ่านช่วงแล้งระยะเวลาหนึ่งส่งผลทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำเท่ากับ 0.00 ตามลำดับ

3. ผลผลิตสดเชอร์รี่และปริมาณรอยเท้าน้ำของกาแฟอะราบิกา

ผลผลิตสดเชอร์รี่ของกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์คาติมอร์ในแปลงเกษตรหลวง (ขุนวาง) ในช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566) ให้ผลผลิตสดเชอร์รี่เฉลี่ย 1.24±0.28 ตัน/ไร่เนื้อที่ให้ผล (เนื้อที่ให้ผลคำนวณจากระยะระหว่างแถวและต้น 2 x 2 เมตร จำนวน 400 ต้นที่ให้ผลผลิตทุกต้น/ไร่) ขณะที่ฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 เฉลี่ย 4.31±0.86 ตัน/ไร่ ตามลำดับ สำหรับกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์ H420 ในแปลงเกษตรหลวง (แม่จอน) ฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 ให้ผลผลิตสดเชอร์รี่เฉลี่ย 2.29±0.78 ตัน/ไร่ ขณะที่ฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 เฉลี่ย 2.53±0.51 ตัน/ไร่ ตามลำดับ ดัง Figure 5 จากข้อมูลดังกล่าวผลผลิตเชอร์รี่สดของกาแฟทั้ง 2 สายพันธุ์ ให้ผลผลิตแต่ละฤดูกาลค่อนข้างมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Usva *et al*. (2020) ได้ทำการสำรวจผลผลิตสดเชอร์รี่ของแปลงเกษตรกรที่ปลูกกาแฟอะราบิกาในประเทศบราซิล ฮอร์นดูรัส และนิคารากัวมีผลผลิตเฉลี่ย 1.78 0.89 และ 0.76 ตัน/ไร่ นอกจากนี้ Silva *et al*. (2022) รายงานว่าผลผลิตเชอร์รี่สดของกาแฟอะราบิกาในสภาพอากาศประเทศบราซิลให้ผลผลิตเฉลี่ย 0.82 ตัน/ไร่ นอกจากนี้ในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 ให้ผลผลิตมากกว่าฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 เนื่องจากระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอก (ธันวาคม-กุมภาพันธ์) มีปริมาณน้ำฝนที่ตกในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 เฉลี่ย 1.7±1.1 มิลลิเมตร/เดือน น้อยกว่าฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 เฉลี่ย 19.5±6.7 มิลลิเมตร/เดือน เพราะ Visser and Mallon (2021) กล่าวว่าในช่วงฤดูแล้ง (ธันวาคม - กุมภาพันธ์) ถ้ามีปริมาณน้ำฝนตกในพื้นที่สามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณตาดอกออกอย่างประปราย ให้ผลผลิตต่ำยากแก่การดูแลรักษาและเก็บเกี่ยว เพราะการเจริญเติบโตของตาดอกต้องอาศัยสภาวะความเครียดจากการขาดน้ำในช่วงฤดูแล้งประมาณ 2 ถึง 3 เดือน ดังกล่าวในการพัฒนาของตาดอกให้สมบูรณ์ (bud formation stage) สำหรับปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาและปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมด แปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566) มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียวเฉลี่ย 1,832.6±636.2 ลิตร/กิโลกรัม ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาเฉลี่ย 1.5±0.5 ลิตร/กิโลกรัม รวมเป็นปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมด

เฉลี่ย 1,834.1±636.8 ลิตร/กิโลกรัมขณะที่ในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) มีปริมาณรอยเท้าสีเขียว ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา และปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดลดลง เนื่องจากมีผลผลิตเชอร์รี่สดต่อไร่ที่เพิ่มขึ้นจากฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 จากค่าเฉลี่ย 1.24±0.28 ตัน/ไร่เนื้อที่ให้ผล เป็น 4.31±0.86 ตัน/ไร่เนื้อที่ให้ผล ทำให้มีปริมาณการใช้น้ำ (ลิตร/หน่วยผลิตผลเชอร์รี่สด) ของกาแฟอะราบิกาลดลง ที่มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียวเฉลี่ย 355.8±71.7 ลิตร/กิโลกรัม ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาเฉลี่ย 0.3±0.1 ลิตร/กิโลกรัม รวมเป็นปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ย 356.0±71.7 ลิตร/กิโลกรัมตามลำดับดัง Figure 5 คล้ายคลึงกับแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) ในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียวเฉลี่ย 1,245.3±294.1 ลิตร/กิโลกรัม ปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงินเฉลี่ย 42.8±10.0 ลิตร/กิโลกรัม ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาเฉลี่ย 0.2±0.0 ลิตร/กิโลกรัม รวมเป็นปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ย 1,288.2±303.1 ลิตร/กิโลกรัมตามลำดับ เนื่องจากมีการให้น้ำชลประทานเสริมในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 เพียงระยะเวลา 2 เดือน ในช่วงมีนาคม พ.ศ. 2565 ที่มีการให้น้ำเฉลี่ย 20.7±2.7 มิลลิเมตร/เดือน และเดือน เม.ย. 65 เฉลี่ย 21.3±2.1 มิลลิเมตร/เดือน เนื่องจากความชื้นดินในช่วงระยะเวลาดังกล่าวมีความชื้นดินอยู่ในระดับต่ำประกอบกับ เพื่อรักษาความสมบูรณ์ของต้นกาแฟสายพันธุ์ H420 ในการเริ่มต้นการทดลองและเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้มีการแสดงผลของปริมาณรอยเท้าน้ำสีน้ำเงินในช่วงฤดูการผลผลิตครั้งที่ 1 ดังกล่าว ขณะที่ในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทา และปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดลดลง เนื่องจากมีผลผลิตเชอร์รี่สดต่อไร่ที่เพิ่มขึ้นจากฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 จากค่าเฉลี่ย 2.29±0.78 ตัน/ไร่เนื้อที่ให้ผล เป็น 2.53±0.51 ตัน/ไร่เนื้อที่ให้ผล ทำให้มีปริมาณการใช้น้ำลิตรต่อหน่วยผลิตผลเชอร์รี่สดของกาแฟอะราบิกาลดลง ที่มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียวเฉลี่ย 769.2±175.0 ลิตร/กิโลกรัม ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเทาเฉลี่ย 0.1±0.0 ลิตร/กิโลกรัม รวมเป็นปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ย 769.4±175.0 ลิตร/กิโลกรัมตามลำดับดัง Figure 5 จากผลดังกล่าวทั้งหมดพบว่า ปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมด ทั้ง 2 ฤดูกาลผลผลิตทั้งในแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวางและแม่จอน) มีปริมาณรอยเท้ารวมทั้งหมดน้อยกว่า Silva *et al.* (2022) รายงานว่าปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดของกาแฟอะราบิกาในสภาพอากาศของประเทศบราซิลมีปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดของกาแฟอะราบิกาเฉลี่ย 2,498.7 ลิตร/กิโลกรัมของผลสดเชอร์รี่ ขณะที่ Hoekstra and Chapagain (2008) รายงานว่าปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดต่อผลผลิตเชอร์รี่สดของกาแฟทั่วโลกเฉลี่ย 17,373 ลิตร/กิโลกรัม

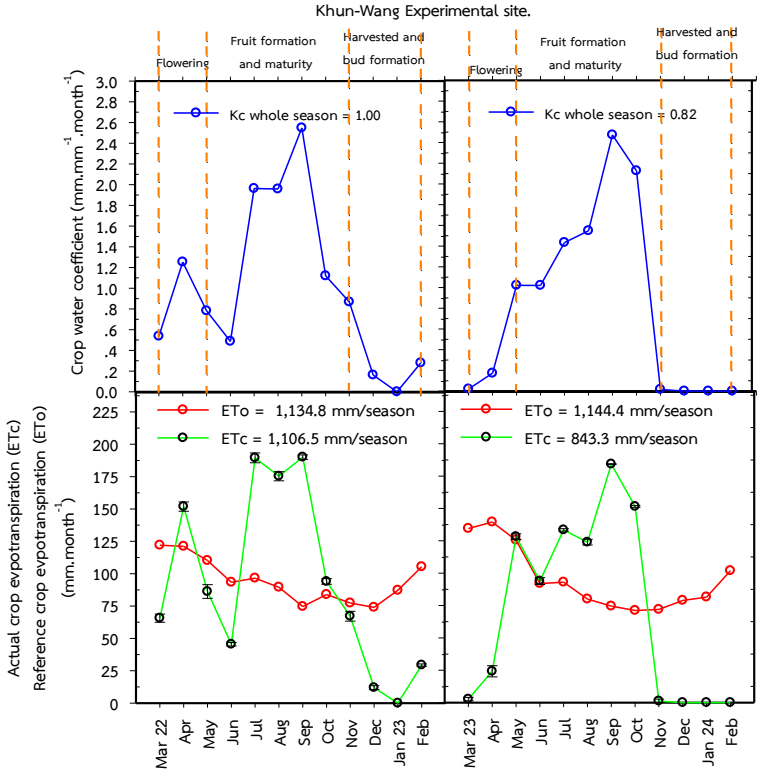

Figure 3 Actual crop evapotranspiration (ETc) and crop water coefficient (Kc) of Catimor cultivar

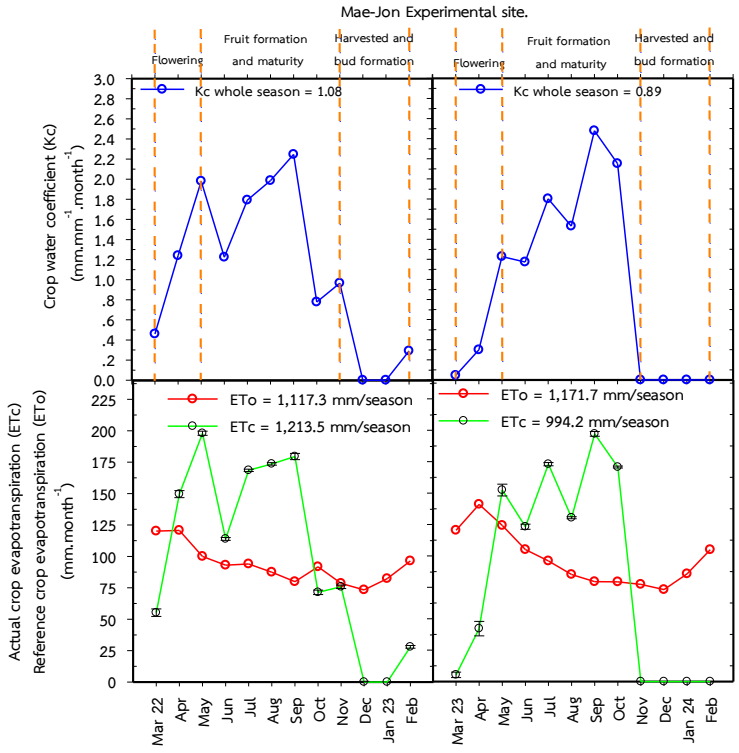

Figure 4 Actual crop evapotranspiration (ETc) and crop water coefficient (Kc) of H420 cultivar

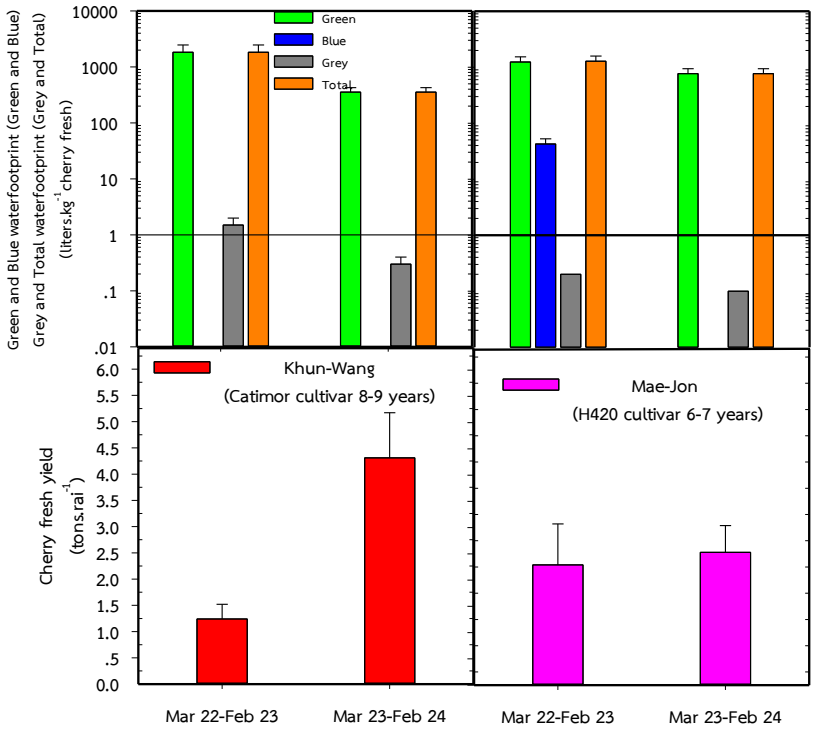

Figure 5 Cherry fresh yield and water footprint amount on both experimental sites

สรุปผลการทดลอง

สำหรับสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ (Kc) ของกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์คาติมอร์อายุ 8-9 ปี ของแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 (มีนาคม พ.ศ. 2565 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2566) ช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.90±0.36 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.39±0.29 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.15±0.08 ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเท่ากับ 1.00±0.23 สำหรับช่วงผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) ช่วงระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.10±0.08 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.38±0.30 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.00±0.00 ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเท่ากับ 0.82±0.26 ขณะที่แปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) ที่ปลูกกาแฟอะราบิกาสายพันธุ์ H420 อายุ 6 - 7 ปี ในช่วงฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 ระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.85±0.39 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.57±0.22 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.10±0.10 มม./มม./เดือน ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเฉลี่ย 1.08±0.23 สำหรับช่วงผลผลิตครั้งที่ 2 (มีนาคม พ.ศ. 2566 - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567) ระยะดอกบานมีค่าเฉลี่ย 0.17±0.13 ระยะพัฒนาจนถึงการสุกแก่ของผลมีค่าเฉลี่ย 1.48 ± 0.30 และระยะเก็บเกี่ยวผลผลิตจนถึงสร้างตาดอกมีค่าเฉลี่ย 0.00±0.00 ที่มีค่าเฉลี่ยตลอดฤดูกาลเท่ากับ 0.89±0.27 สำหรับผลผลิตสดเชอร์รี่ของกาแฟอะราบิกาของแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ในช่วงฤดูกาลผลผลิตทั้ง 2 ฤดูกาลให้ผลผลิตสดเชอร์รี่มีค่าเฉลี่ย 1.24±0.28 และ 4.31±0.86 ตัน/ไร่ ขณะที่กาแฟอะราบิกาของแปลงเกษตรหลวงแม่จอนทั้ง 2 ฤดูกาลให้ผลผลิตสดเชอร์รี่เฉลี่ย 2.29±0.78 และ 2.53±0.51 ตัน/ไร่ สำหรับปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน สีเทาและปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดใน

ฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 1,832±636.2 0.0±0.0 1.5±0.5 และ 1,834.1±636.8 ลิตร/กิโลกรัม ของผลเชอร์รี่สดตามลำดับ ขณะที่ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงินสีเทา และปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ยในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 มีค่าเฉลี่ย 355.8±71.7 0.0±0.0 0.3±0.1 และ 356.0±71.7 ลิตร/กิโลกรัมของผลเชอร์รี่ตามลำดับ ขณะที่แปลงเกษตรหลวงแม่จอนที่มีปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน สีเทา และปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ยในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 1,245.3±294.1 42.8±10.0 0.2±0.0 และ 1,288.2±303.1 ลิตร/กิโลกรัมของผลเชอร์รี่สดตามลำดับ ขณะที่ปริมาณรอยเท้าน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน สีเทา และปริมาณรอยเท้าน้ำรวมทั้งหมดเฉลี่ยในฤดูกาลผลผลิตครั้งที่ 2 มีค่าเฉลี่ย 769±175.0, 0.0±0.0 0.1±0.0 และ 769.4±175.0 ลิตร/กิโลกรัมของผลเชอร์รี่สดตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่มีปริมาณน้ำฝนตกของแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (ขุนวาง) ทั้ง 2 ฤดูกาลเก็บเกี่ยวเท่ากับ 2,792.9 และ 2,020.0 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก ตลอดจนแปลงเกษตรหลวงเชียงใหม่ (แม่จอน) เท่ากับ 2,839.3 และ 2,415.6 มิลลิเมตร/ฤดูกาลปลูก ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณสำหรับการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งกรมวิชาการเกษตรที่สนับสนุนสถานที่ และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการดำเนินการทดลองในครั้งนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

Allen, R. G., L. S. Perreira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome.

Arphasiripon, P. 1986. Coffee plantation. Horticultural Research Institute, Department of Agriculture. [in Thai]

Babel, M. S., B. Shrestha and S. R. Perret. 2011. Hydrological impact of biofuel production: A case study of the Khlong Phlo watershed in Thailand. Agriculture Water Management 101(1): 8-26.

Chapagain, A. K., A. Y. Hoekstra, H. H. G. Savenije and R. Gautam. 2009. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics 60(1): 186-203.

Department of Agriculture. 2019. Arabica coffee production management handbook. Horticultural Research Institute, Ministry of Agriculture and Cooperative. [in Thai]

Department of Soil Science. 2001. Soil science fundamental. Faculty of Agriculture, Kasetsart University. [in Thai]

Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, Rome.

Haggar, J. and K. Schepp. 2012. Coffee and climate change: Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. Climate change, Agriculture and Natural Resources. University of Greenwich, London.

Highland Research and Development Institute. 2015. Quality arabica coffee production and cultivation handbook. Royal Project. [in Thai]

Hoekstra, A.Y. and A. K. Chapagain. 2008. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. Blackwell Publishing, UK.

Hoekstra, A. Y. and P. Q. Hung. 2005. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. Global Environment Change 15(1): 45-56.

Jermsiri, C. 2003. Soil physical properties analysis methodology. Agricultural Production Sciences Research and Development Bureau, Department of Agriculture. [in Thai]

Liu, C., C. Kroeze, A.Y. Hoekstra and W. Gerbens-Leenes. 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus input to major world rivers. Ecological Indicators 18: 42-49.

Meteorological Department. 2019. Meteorology. The Promotion of Academic Olympiad and Development of Science Education Foundation, Ministry of Digital Economy and Society. [in Thai]

Niyibigira, E. I. 2019. Arabica coffee handbook a sustainable coffee industry with high stakeholder value for social economic transformation. Coffee Development Authority, Uganda.

Patthanapichai, S., T. Hongchotithanawadee, I. Kritsom, W. Ngamsomjit and N. Wongsuphaluk. 2019. Robusta coffee water use coefficient in yield early stage. Irrigation Agricultural New Journal 23(88): 6-14. [in Thai]

Picetti, R., M. Deeney, S. Pastorino, M. R. Miller, A. Shah, D. A. Leon, A. D. Dangour and R. Green. 2022. Nitrate and nitrite contamination in drinking water and cancer risk. A system review with meta-analysis. Environmental Research 210: 112988.

Ratthamma, P. 2012. An efficient water usage about water footprint. The Department of Science Service Journal (60) 189: 35-37. [in Thai]

Silva, C.A., R.E.F. Teodoro and B. Melo. 2008. Productivity and yield of coffee plant under irrigation levels. Pesq Agropecu Bras 43(3): 387-394.

Silva, L. M. R., M. F. Ribeiro, W. P. M. Ferreira, P. R. R. Junior and R. B. A. Fernandes,. 2022. Water footprint of Arabica coffee from "Matas de Minas" under shade management. Revista Ceres 69(4): 488-494.

Sun, H., Y. Shen, Q. Yu, G. N. Flerchinger, Y. Zhang, C. Liu and X. Zhang. 2010. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the north China plain.

Agricultural Water Management 97(8) : 1139-1145.

Thongaram, D., W. Tangkoskul, N. Jiracheewee and I. Nanthakrit. 1999. Design and water supply technology. Kehakaset Magazine. [in Thai]

Trade Policy and Strategy Office. 2024. Present Thailand coffee situation. Ministry of Commerce.

Usva K., T. Sinkko, F. Silvenius, L. Riipi and H. Hannele. 2020. Carbon and water footprint of coffee consumed in Finland-life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment 25: 1976-1990.

Visser, M. and G. Mallon. 2021. The water footprint of Arabica and Robusta coffee bean production in South America. Thesis Faculty Spatial Science is powered, University of Southampton.

Willson, K.C. 1985. Climate and soil. Springer Nature Link 97-98.

Xu, Y., K. Huang, Y. Yu and X. Wang. 2015. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: A logarithmic mean Divisia index decomposition analysis. Journal of Cleaner Production 87: 180-187.