วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์

Water Footprint of Organic Jasmine RiceinSurin Province

มาณพ พรมดี[1], อดิชัย พรพรหมินทร์[2] และ สุรชัยลิปิวัฒนาการ[3]

[1]นิสิตปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2,3]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: [1] kee_mo60@hotmail.com, [2] fengacp@ku.ac.th, [3]fengsuli@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วอเตอร์ฟุตปริ้นของสินค้าเป็นดัชนีบ่งชี้แสดงปริมาณการใช้น้ำจืดรวมทุกขั้นตอนของการผลิตสินค้านั้นๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อหน่วยของสินค้าเนื่องจากปัจจุบันน้ำเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด การบริหารจัดการน้ำและการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและท้าทาย ดังนั้นวอเตอร์ฟุตปริ้นสามารถเป็นดัชนีหนึ่งในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้น้ำได้ จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ภาคเกษตรกรรมของไทยมีการใช้น้ำจำนวนมากในการผลิตข้าว ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวไทยมีค่าสูงกว่าประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งข้าวถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญอันดับหนึ่งของประเทศไทย อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันดีว่าสายพันธุ์ข้าวและกระบวนการเพาะปลูกที่แตกต่างกันก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลผลิตและวอเตอร์ฟุตปริ้นแตกต่างกันด้วย ข้าวอินทรีย์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง โดยเฉพาะข้าวหอมมะลิอินทรีย์ที่ส่วนใหญ่ทำการผลิตและส่งขายประเทศแถบยุโรป ซึ่งพื้นที่หลักที่ปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในไทยร้อยละ 80 จะอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งในปัจจุบัน กระแสของการรักสุขภาพของคนในโลกเพิ่มขึ้นทำให้การบริโภคอาหารกลุ่มเกษตรอินทรีย์จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอนาคตในการศึกษาครั้งนี้ใช้หลักการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นเริ่มตั้งแต่กระบวนการเตรียมแปลงจนถึงได้ผลผลิตข้าวเปลือกโดยหลักการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นใช้ข้อมูลที่มีความจำเป็นทางสภาพภูมิอากาศเพื่อหาค่าการคายระเหยของพืชโดยใช้วิธีของ Penman-Monteith รวมทั้งข้อมูลรายละเอียดในการทำเกษตรกรรมในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์โดยใช้ข้อมูลฤดูกาลเพาะปลูก พ.ศ. 2552/53 ซึ่งพบว่าเกษตรกรในพื้นที่เพาะปลูกข้าวโดยวิธีหว่านแห้งและอยู่นอกเขตชลประทานผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์มีผลผลิตเฉลี่ย 235 ตัน/ตร.กม. (376 กก/ไร่) ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นรวมเท่ากับ 2,897 ลบ.ม/ตัน แยกเป็นค่ากรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น 2,277 ลบ.ม/ตัน และค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้น 621 ลบ.ม/ตัน ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าการศึกษาวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวที่ผ่านมา แต่เนื่องจากไม่มีบลูวอเตอร์ฟุตปริ้น ดังนั้นการปลูกข้าวในงานวิจัยนี้จึงแทบจะไม่มีผลกระทบ

ด้านการแย่งชิงน้ำและมีภาระต้นทุนในการใช้ปุ๋ยเคมีและการกำจัดศัตรูพืชต่ำกว่างานวิจัยก่อนหน้านี้อย่างมาก

คำสำคัญ: วอเตอร์ฟุตปริ้น, ข้าวอินทรีย์, ข้าวหอมมะลิ

Abstract

Water footprint of products is an indicator showing the volume of fresh water using in every process both directly and indirectly. At present, water has been known as a limited resource. Thus, water management and water use efficiency are important and challenging issues. From previous research, the agricultural sector of Thailand has used a lot of water to produce rice. Water footprint of rice in Thailand is higher than other countries in Southeast Asia. Rice is considered as the first priority of Thailand economic crops. However, it is known that different varieties and cultivation of rice are another reason affecting products and water footprints. Organic rice was an alternative especially organic jasmine rice exported mainly to European countries. The main cultivation area of organic jasmine rice in Thailand up to 80 percent is in the Northeastern part. Since there is the trend of health concerns from people around the world, the dietary organic groups are likely to increase in the future. In this study, the principles used to calculate water footprint from a prepared the planting process to the yield of paddy. In this study, the principles used to calculate water footprint are recommended by the local data of climate for finding the evapotranspiration by the Penman-Monteith method and the detailed information on agriculture are collected from the study area. Using agricultural season data in year 2009/2010, it is found the farmers in the study area had grown rice by dry-paddy sown field and all of the paddy fields are not in the irrigated area. The results show that organic jasmine rice in Surin province had the averaged yield of about 235 ton/km^2 (376 kg/Rai), total water footprint was 2,897 m^3/ton comprised of green water footprint of 2,277 m^3/ton and gray water footprint of 621 m^3/ton. The value of water foot print in this study is higher than previous rice research in other places. Since there is no blue water footprint, rice cultivation in this study may not contribute any water conflicts and chemical fertilizers and pesticidewas much less cost than previous research.

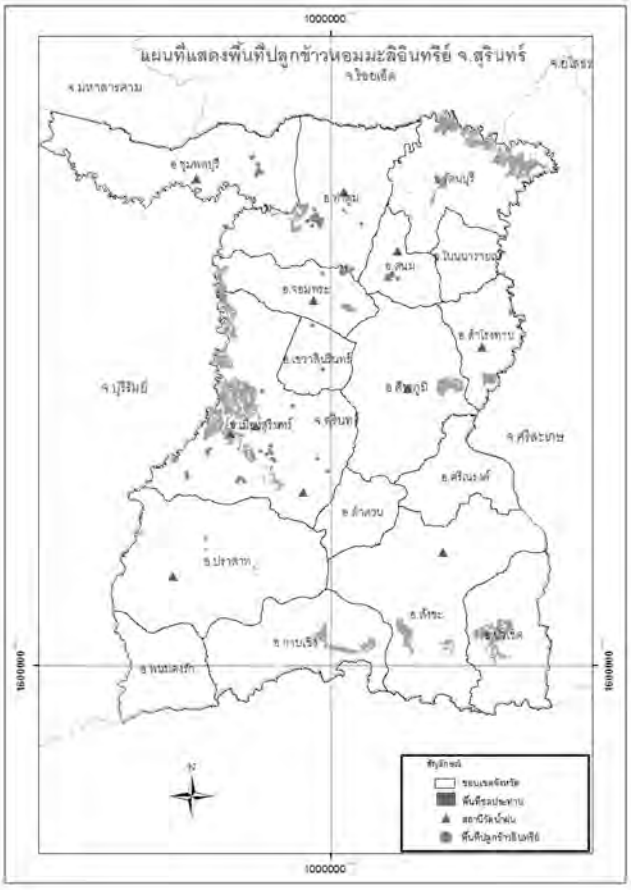
Keywords: water footprint, organic rice, jasmine rice

บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด แต่ความต้องการใช้น้ำกำลังเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องตามจำนวนประชากรและความเติบโตทางเศรษฐกิจ การใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นแนวทางที่ต้องบริหารจัดการและเร่งปฏิบัติ วอเตอร์ฟุตปริ้นถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่อาจจะกลายเป็นความท้าทายสำหรับภาคเกษตรกรรมรวมไปถึงอุตสาหกรรม

อาหารที่ต้องใช้น้ำเป็นตัวแปรสำคัญในการผลิตในอนาคต วอเตอร์ฟุตปริ้นจึงเป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณการใช้น้ำจืดรวมทุกขั้นตอนของการผลิตสินค้านั้นๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อหน่วยของสินค้า โดยการประเมินวอเตอร์ฟุตปริ้น นอกจากต้องดูจากปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตแล้วยังต้องพิจารณาถึงแหล่งน้ำ (Source of water) ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นวอเตอร์ฟุตปริ้นจึงสามารถใช้ในการเปรียบเทียบได้ว่าการผลิตสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ในแต่ละแห่งมีการใช้น้ำปริมาณเท่าใดและแตกต่างกันอย่างไร และอาจเป็นเครื่องมือในการกีดกันสินค้าโดยใช้ข้ออ้างเรื่องผลกระทบสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงควรมีการศึกษาวอเตอร์ฟุตปริ้นของการปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลงลึกถึงรายละเอียดระดับพื้นที่ย่อย ในเขตจังหวัดสุรินทร์ในฤดูกาลเพาะปลูก พ.ศ. 2552/53 ซึ่งการเลือกใช้พื้นที่ศึกษาระดับเล็กๆ นั้นทำให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องชัดเจน มีการศึกษาประเมินปริมาณน้ำที่สูญเสียไปจากขั้นตอนต่างๆ ทั้งระบบ ภายใต้เงื่อนไขด้านสังคม เศรษฐกิจ และภูมิศาสตร์กายภาพ การมีข้อมูลวอเตอร์ฟุตปริ้นที่ถูกต้องยังช่วยให้เกษตรกรและผู้วางนโยบายสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้องในการจัดการน้ำซึ่งจะทำให้การผลิตสินค้าเกษตรมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนั้นการศึกษาวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงข้อมูลรายละเอียดเชิงลึกของเกษตรกรแต่ละรายในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ เพื่อจะได้ทราบว่าในการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกรแต่ละรายมีการใช้น้ำหรือวอเตอร์ฟุตปริ้นแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ต่อไป



ภาพที่ 1 แผนที่แสดงรายละเอียดข้อมูลของพื้นที่ศึกษาวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์

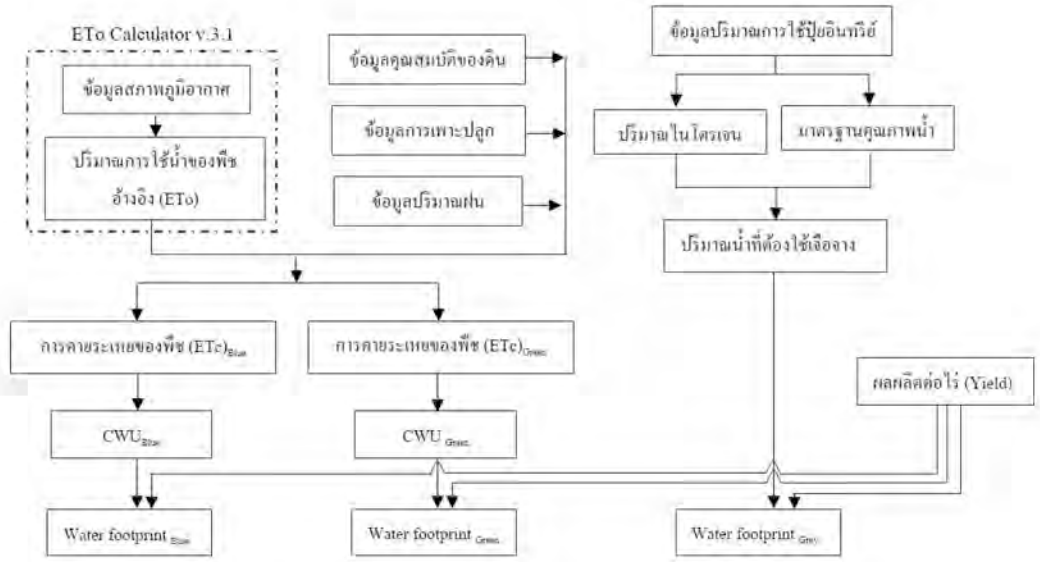
ระเบียบวิธีวิจัย

(1) นิยามของวอเตอร์ฟุตปริ้น

วอเตอร์ฟุตปริ้นเป็นดัชนีบ่งชี้แสดงปริมาณการใช้น้ำจืดรวมทุกขั้นตอนของการผลิตสินค้านั้นๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อหน่วยของสินค้าในส่วนกรณีภาคเกษตรกรรมการเพาะปลูกพืชไร่ วอเตอร์ฟุตปริ้น (Water Footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำจืดทั้งหมดที่ถูกใช้ในการเพาะปลูกพืชไร่เพื่อใช้เป็นดัชนีในการวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้น้ำที่เกี่ยวเนื่องกับการเพาะปลูก วอเตอร์ฟุตปริ้น แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

- บูลวอเตอร์ฟุตปริ้น หมายถึง การคายระเหยของปริมาณน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินของน้ำจากการชลประทานตลอดจนห่วงโซ่ของการผลิตสินค้า เมื่อเกิดการคายระเหยแล้วจะตกลงกลับมาสู่พื้นที่รับน้ำอื่นหรือลงสู่ทะเลหรือการรวมเข้าไปสู่รูปแบบสินค้า
- กรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น หมายถึง น้ำฝนที่ตกลงมาแล้วซึมลงดิน ถูกพืชนำไปใช้ในการผลิตสินค้าหรือบริการ
- เกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้น หมายถึง ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตสินค้าหรือบริการ ซึ่งคำนวณจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำดีตามค่ามาตรฐาน

ตัวอย่างค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวที่น่าสนใจคือค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวเฉลี่ยของโลกมีค่า 1,325 ลูกบาศก์เมตร/ตัน วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวไทยมีค่าสูงถึง1,617 ลูกบาศก์เมตร/ตัน สูงกว่าประเทศแถบอาเซียนอย่างเวียดนาม อินโดนีเซีย และพม่า ซึ่งมีค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นอยู่ที่ 638, 1,187 และ 1,274 ลูกบาศก์เมตร/ตัน (Chapagain and Hoekstra, 2010) ตามลำดับสำหรับในประเทศไทย การศึกษาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกะเทียมมีค่าวอเตอร์ฟุตปริ้น 1,600 ลูกบาศก์เมตร/ตัน (ธีระวัฒน์, 2555) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวโพด (ทิพย์ปภาและคณะ, 2554), วอเตอร์ฟุตปริ้นของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในประเทศไทย (ชนาธิปกรณ์และธำรงรัตน์, 2554), วอเตอร์ฟุตปริ้นของกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมแป้งข้าว (รมณี และ ปุณมณี, 2554) สำหรับแบบจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองเดิมที่ถูกใช้โดยธีระวัฒน์ (2555) มีกระบวนการในการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งทำให้สามารถคำนวณผลกระทบของการขาดน้ำหรือความเครียดน้ำ (water stress) เนื่องจากพื้นที่วิจัยอยู่นอกเขตชลประทานได้



ภาพที่ 2 แผนผังการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์

(2) วิธีการคำนวณวอเตอร์ฟุตปริ้น

วอเตอร์ฟุตปริ้นทั้งหมดในพืช (Total water footprint, WFtotal) คำนวณจากผลรวมของบลูวอเตอร์ฟุตปริ้น (WFblue) กรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น (WFgreen) และเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้น (WFgrey) ดังสมการนี้

$$WF_{total} = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (1)$$

โดยวอเตอร์ฟุตปริ้นสามารถคำนวณได้จากปริมาณน้ำที่พืชใช้ (Crop water use, CWU) (หน่วย m^3/rai) หารด้วยปริมาณผลผลิตของพืชนั้น (yield, Y)(หน่วย ตัน/ไร่) ดังนี้

$$(WF_{total}) = \frac{(CWU_{total})}{Y} \quad (2a)$$

$$(WF_{green}) = \frac{(CWU_{green})}{Y} \quad (2b)$$

$$(WF_{blue}) = \frac{(CWU_{blue})}{Y} \quad (2c)$$

จากสมการ (2a), (2b) และ(2c) จะพบว่า ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) เป็นส่วนหนึ่งในการคำนวณหาวอเตอร์ฟุตปริ้น (WF) โดยทั่วไป นักวิจัยจะสนใจปริมาณน้ำที่พืชใช้ เพื่อพิจารณาการให้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุด แต่วอเตอร์ฟุตปริ้นมีความหมายที่มากกว่านั้นโดยมองในแง่ของการใช้น้ำในการผลิตสินค้าต่อหน่วยสินค้า ซึ่งทำให้สามารถเปรียบเทียบการผลิตสินค้าชนิดเดียวกันที่พื้นที่ต่างกันหรือเปรียบเทียบการผลิตสินค้าต่างชนิดกัน ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีในการวางแผนและบริหารการเลือกผลิตสินค้าและช่วงเวลาในการผลิตสินค้าที่ทำให้การใช้น้ำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นซึ่งคำนวณจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางน้ำเสียให้ความเข้มข้นลดลงให้อยู่ในระดับมาตรฐานที่ยอมรับได้ มาตรฐานของแม่น้ำลำคลองและคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำประเภท 2 โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ดังสมการ

$$WFgrey = \frac{(\alpha * AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (3)$$

เมื่อ α คือ การรั่วซึมออกของปุ๋ย เนื่องจากไม่มีค่าจากภาคสนามในที่นี้จึงสมมติให้เท่ากับ 10 % ของ AR (Mekonnen and Hoekstra, 2010) ค่า AR คือ อัตราการใช้ปุ๋ยในพื้นที่ต่อไร่ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งใช้ข้อมูลจากการสำรวจ Cmax คือ ความเข้มข้นของไนเทรต (NO_3) ในหน่วยของไนโตรเจน ซึ่งค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้อ้างอิงจากมาตรฐานของแม่น้ำลำคลองและคุณภาพของน้ำในแหล่งน้ำประเภท 2 โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีค่าเท่ากับ 5 มิลลิกรัม/ลิตร Cnat คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในธรรมชาติที่พิจารณา มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในที่นี้จึงสมมติให้เท่ากับศูนย์ (Mekonnen and Hoekstra, 2010) การใช้ปุ๋ยอินทรีย์มูลสัตว์(วัว) มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 1.1 % และปุ๋ยพืชสดก่อนไถกลบ (ถั่วเขียว-ข้าว) น้ำหนักสดเฉลี่ย 1,617 กิโลกรัม/ไร่ มีปริมาณไนโตรเจนเท่ากับ 0.59 % (กลุ่มงานวิจัยความอุดมสมบูรณ์ของดินและปุ๋ยข้าวและธัญพืชเมืองหนาว, 2534)

(3) วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่พืชใช้และการคายระเหยของพืช

ปริมาณน้ำที่พืชใช้ทั้งหมด ปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบบลูวอเตอร์ฟุตปริ้น และปริมาณน้ำที่พืชใช้แบบกรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$CWU_{total} = factor \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_d \quad (4)$$

$$CWU_{blue} = factor \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} = factor \times \sum_{d=1}^{IW} I \quad (5)$$

$$CWU_{green} = factor \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} = CWU_{total} - CWU_{blue} \quad (6)$$

โดย d คือ ลำดับวันที่เพาะปลูก lgp คือ จำนวนวันที่เพาะปลูกทั้งหมด factor เป็นพารามิเตอร์ ใช้แปลงหน่วย ในกรณีที่การคายระเหยของพืช (ET) มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) และปริมาณน้ำที่พืชใช้ (CWU) มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร/ไร่ (m^3/rai) จะมีค่าเท่ากับ 1.6 และ I คือ ปริมาณน้ำชลประทาน ในกรณีที่พิจารณาการเพาะปลูกนอกเขตชลประทาน อาจมีการให้น้ำในรูปแบบที่ไม่ใช่น้ำฝน เช่น น้ำบาดาล น้ำจากบ่อเก็บกักในพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น แต่เนื่องจากในการศึกษานี้ไม่มีข้อมูลการให้น้ำดังกล่าว จึงสมมติให้ค่า I, ETblue และ CWUblue จะเท่ากับศูนย์สำหรับนอกเขตชลประทาน

ค่าการคายระเหยของพืช (Evapotranspiration, ET_c มีหน่วย mm/d) คำนวณจาก

$$ET_c = K_s K_c ET_o \quad (7)$$

โดยที่ ET_o คือ ค่าการคายระเหยอ้างอิงของพืช (Reference Crop Evapotranspiration, ET_o มีหน่วย มิลลิเมตร/วัน (mm/day) คำนวณได้จากสมการ Penman-Monteith FAO 56. (Allen et al., 1998) ดังนี้

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (8)$$

เมื่อ การคายระเหยอ้างอิง (ET_o, mm/day)ได้จากค่าคงที่ 0.408 ความชันของเส้นโค้งความดันไออิ่มตัว (, kPa/Celsius) รังสีสุทธิ (R_n, MJ/m^2/day) ฟลักซ์ของการถ่ายเทความร้อนของดิน (G, MJ/m^2/day) ค่าคงที่ไซโครเมติก (, kPa/Celsius) ค่าคงที่ 900 อุณหภูมิเฉลี่ย (T, Celsius) ค่าคงที่การเปลี่ยนหน่วย 273 ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร (u_2, m/s) ความดันไออิ่มตัวเฉลี่ย (e_s, kPa) ความดันไอจริง (e_a, kPa) ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร (u_2, m/s) และ K_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์พืช (Crop Coefficient) ซึ่งช่วงการเจริญเติบโตของพืชนั้นสมมติให้ค่า K_c มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงจากช่วงเริ่มต้นการเพาะปลูก ($K_{c,ini}$) ถึงช่วงกลางของการเพาะปลูก ($K_{c,mid}$) และมีค่าคงที่ไปจนถึงระยะสุดท้ายของการเพาะปลูกสมมติให้ค่า K_c ลดลงเป็นเส้นตรงจาก $K_{c,mid}$ ไปจนถึง $K_{c,end}$ และ K_s คือ สัมประสิทธิ์ความเครียดน้ำ (Water Stress) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ในกรณีที่น้ำในดินในเขตรากพืชมีค่าการพร่อง (Depletion, D_r มีหน่วย mm) น้อยกว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ที่ใช้การได้ (Readily available soil water in the root zone, RAW มีหน่วย mm) จะได้ว่า $K_s = 1$ ในกรณีที่ D_r > RAW จะได้ว่า K_s ลดลงเชิงเส้นตรง และถ้า D_r มีค่าเท่ากับน้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (Total available soil water in the root zone, TAW มีหน่วย mm) จะได้ว่า $K_s = 0$ ดังในสมการที่ (8a) (8b) และ (8c) ส่วนค่าการคายระเหยอ้างอิงคำนวณจากข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา จังหวัดสุรินทร์ เนื่องจากข้อมูลในพื้นที่ของการศึกษาครั้งนี้ยังไม่สมบูรณ์ จึงใช้โปรแกรม ET_o Calculator v.3.2 (FAO, 2009) ในการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิง

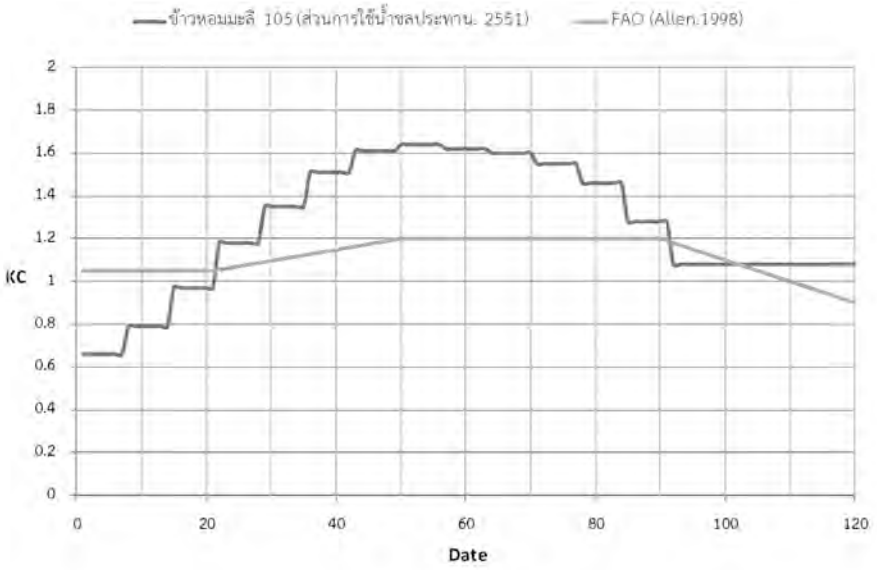
$$K_s = 1 \text{ กรณี } D_r \leq RAW \quad (8a)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \text{ กรณี } TAW < D_r \leq RAW \quad (8b)$$

$$K_s = 0 \text{ กรณี } D_r = TAW \quad (8c)$$

ในการศึกษานี้ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์พืช (K_c) ใช้ค่าจากกรมชลประทาน และได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าของ FAO 56. (Allen et al.,1998) พบว่า K_c ของ FAO มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.20 ต่ำกว่าของกรมชลประทานที่เท่ากับ 1.64 ดังแสดงในภาพที่ 3 จากผลการวินิจฉัยเบื้องต้นทำให้ทราบว่า หากใช้ค่า K_c ของ FAO จะส่งผลต่อการคำนวณ

วอเตอร์ฟุตปริ้นสำหรับข้าวในประเทศไทยไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากค่า K_c ที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจพบว่าเกษตรกรในพื้นจังหวัดสุรินทร์ ปลูกข้าวใช้ระยะเวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 100 วัน เนื่องจากเป็นข้าวไวแสง ดังนั้นจึงสมมติให้ช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นใช้ค่า K_c ค่าสุดท้าย (1.08) ของกรมชลประทานต่อไปจนถึงวันเก็บเกี่ยว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นงานวิจัยแรกในประเทศไทยที่วิเคราะห์หาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นในกรณีข้าวเกิดความเครียดน้ำได้ แม้ว่างานวิจัยของธีระวัฒน์ (2555) มีพื้นที่นอกเขตชลประทาน แต่ในความจริงแล้วพื้นที่ดังกล่าวพบว่าได้รับน้ำชลประทานเหมือนกับพื้นที่ในเขตชลประทาน



ภาพที่ 3 สัมประสิทธิ์พืช (Kc) ของข้าวเปรียบเทียบระหว่าง FAO 56. (Allen et al.,1998) และข้าวหอมมะลิ 105 กรมชลประทาน (ส่วนการใช้น้ำชลประทาน, 2551)

(4) วิธีการคำนวณสมดุลระดับน้ำบนแปลงนา

ความต้องการน้ำเพื่อการเจริญเติบโตของต้นข้าวขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำที่ต้องสูญเสียไป 4 ทางด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 4 คือ การคายระเหยของพืช (evapotranspiration) การไหลออกคันดินแบบน้ำท่าผิวดิน (runoff) การซึมลงไปในดิน (percolation) และการซึมในแนวราบหรือด้านข้าง (seepage) ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพของดิน ชนิดของดินสภาพความลึกของชั้นดิน และระดับน้ำใต้ดิน เช่น ดินเหนียวและมีระดับน้ำใต้ดินตื้นจะมีการสูญเสียน้ำประมาณวันละ 1-2 มิลลิเมตร (วิบูลย์, 2526)

พื้นที่ศึกษาใช้ข้อมูลกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตข้าวอินทรีย์ จังหวัดสุรินทร์จำนวน 60 ราย พื้นที่ 91 แปลงดังในภาพที่ 1 เป็นพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 960 ไร่ โดยพื้นทั้งหมดอยู่นอกเขตชลประทาน ไม่มีระบบชลประทานที่สมบูรณ์ มีการใช้น้ำในการเพาะปลูกจากน้ำฝนและลำน้ำธรรมชาติ การศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลฝนจากสถานีวัดฝนของกรมชลประทานและกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งตั้งกระจายอยู่ทั่วพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ รวม 11 สถานี โดยจะเริ่มทำการเพาะปลูกในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคมและจะไปเก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน

ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่ใช้วิธีการเพาะปลูกด้วยวิธีการนาหว่านแห้ง พันธุ์ข้าวที่ทำการเพาะปลูกเป็นพันธุ์ข้าวหอมมะลิ 105 เป็นข้าวไวแสงซึ่งในกระบวนการเพาะปลูกในพื้นที่ศึกษา จากข้อมูลพฤติกรรมการเพาะปลูก ทำให้ได้ขั้นตอนในการคิดคำนวณการใช้น้ำเพื่อการเพาะปลูกดังนี้

- ระยะเวลาในการเตรียมแปลง 7 วันหรือ 1 สัปดาห์ โดยกำหนดให้ใช้น้ำฝนในการเตรียมแปลงในฤดูนาปี
- เริ่มหว่านเมล็ดพันธุ์แห้ง หรือใช้เครื่องหยอดเมล็ดพันธุ์ลงแปลงนาในวันที่ 8 โดยทิ้งไว้หนึ่งวันโดยไม่มีเงื่อนไขในการพิจารณาการสูบน้ำเข้านา เนื่องจากอยู่นอกพื้นที่ชลประทาน แต่จะพิจารณารักษาระดับน้ำในแปลงนาให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับอายุและการเจริญเติบโตของต้นข้าว
- ระดับคันนาเฉลี่ยประมาณ 50 ซม. เพื่อเพิ่มปริมาณการเก็บกักน้ำในแปลงนา โดยถ้าระดับน้ำในแปลงนาสูงกว่า 50 ซม.เป็นน้ำล้น (runoff) คันดินออกจากแปลงนาตลอดช่วงการเจริญเติบโต
- ก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิตประมาณ 10 วัน จะทำการปล่อยน้ำทั้งหมดออกจากแปลงนาเพื่อเตรียมการเก็บเกี่ยวผลผลิต

(5) วิธีการคำนวณสมดุลน้ำในเขตรากพืช

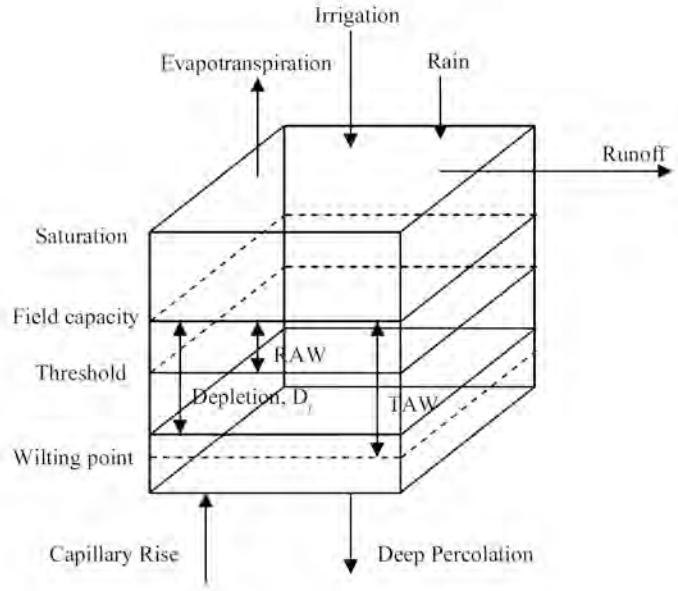
แนวคิดของสมดุลน้ำในเขตรากพืช โดยที่สมมติให้ดินในเขตรากพืชได้รับน้ำจากฝน (Rain) หรือชลประทาน (Irrigation) ในปริมาณมากเกินความสามารถการซึมลงดิน จะมีส่วนเกินที่เป็นน้ำท่าผิวดิน (runoff) ไหลบนผิวดิน น้ำในส่วนที่ซึมลงดินจะทำให้น้ำในเขตรากพืชอยู่ในระดับความชื้นอิ่มตัว (Saturation) ชั่วขณะและส่วนหนึ่งของน้ำจะซึมลึกลง (Deep percolation) ทำให้เหลือน้ำในดินเท่ากับระดับความจุความชื้นสนาม (Field Capacity) ซึ่งสามารถแปลงอยู่ในรูปของระดับน้ำเรียกว่า น้ำที่อยู่ในดินทั้งหมดในเขตรากพืชที่ใช้การได้ (Total available soil water in the root zone, TAW) ในบางครั้งหากระดับน้ำใต้ดินอยู่สูงอาจมีผลกระทบของ Capillary rise ต่อระดับน้ำในเขตรากพืชน้ำในเขตรากพืชสามารถลดลงเนื่องจากการคายระเหยหากน้ำพร่องลงต่ำกว่าระดับน้ำที่มีอยู่ที่ใช้การได้ (RAW) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความเครียดน้ำ ดังกล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาในสมการ (8a) และ (8b) การคำนวณค่าการพร่องของน้ำในเขตรากพืช ณ วันที่ i ($D_{r,i}$) ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) สามารถคำนวณได้จากสมดุลน้ำในเขตรากพืช ดังสมการ

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \qquad (9)$$

โดยที่ P_i คือ น้ำฝนในวันที่ i DP_i คือ น้ำที่สูญเสียออกจากเขตรากพืชโดยการซึมลึกในวันที่ i

I คือ ความลึกน้ำชลประทานที่ซึมลงดินในวันที่ i CR_i คือ capillary rise จากน้ำใต้ดินในวันที่ i

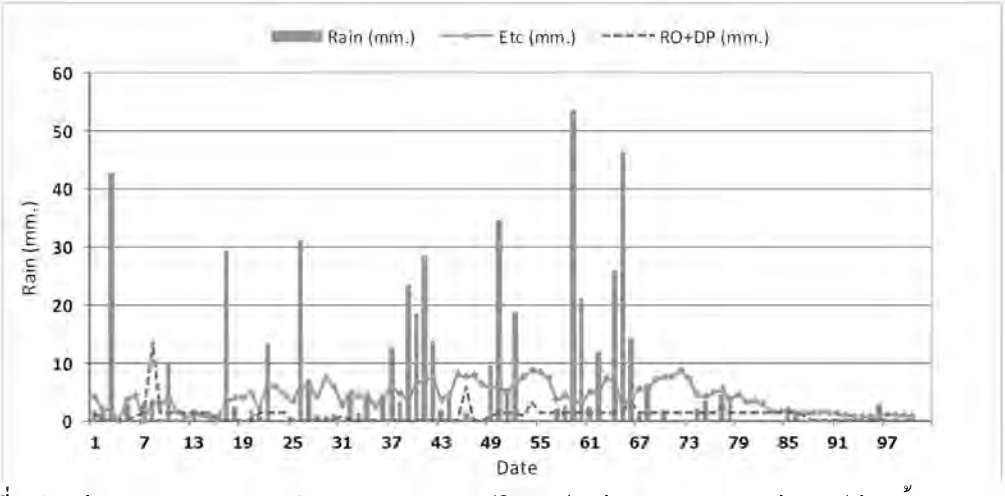
$ET_{c,i}$ คือ การคายระเหยของพืชในวันที่ i RO_i คือ น้ำท่าผิวดินในวันที่ i



ภาพที่ 4 สมดุลน้ำในเขตรากพืชดัดแปลงจาก FAO 56. (Allen et al., 1998)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการศึกษาพบว่าการเพาะปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในช่วงฤดูนาปีวิเคราะห์พฤติกรรมการใช้น้ำในการเพาะปลูกได้ดังในภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการเพาะปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ปริมาณฝนที่ตกลงมาถูกใช้ไปทั้งหมดโดยตลอดช่วงอายุข้าวเฉลี่ย 100 วัน เนื่องจากเป็นช่วงที่เริ่มมีปริมาณฝนตกในพื้นที่ เกษตรกรสามารถใช้น้ำฝนในการเพาะปลูกได้อย่างเต็มที่อีกทั้งไม่ต้องเติมน้ำเข้าแปลงนา ตามช่วงเวลาการเจริญเติบโตของพืช เพื่อรักษาระดับน้ำให้พอเหมาะแก่การเจริญเติบโตของต้นข้าวโดยการคิดคำนวณปริมาณน้ำฝน, กำหนดระดับของคันนา 50 ซม. หากระดับน้ำมากกว่าคือ (Runoff) และใช้ค่าการซึมผ่านดินร่วนปนทราย ใช้ค่าการซึมผ่าน30 มม./ชม.FAO 56 (Allen et al., 1998) ตามเงื่อนไขความลึกของน้ำในแปลงนาที่ได้กำหนด โดยทั้งหมดได้คำนวณปริมาณน้ำเป็นรายวันตามหลักการสมดุลน้ำในแปลงนาและสมดุลน้ำในเขตรากพืชดังได้กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 5 ตัวอย่างผลการคำนวณรายวันจากแบบจำลอง ปริมาณฝน ค่าการระเหย และค่าการปล่อยน้ำและการซึมลึกลงดินในการเพาะปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ จังหวัดสุรินทร์

ผลการคำนวณหาวอเตอร์ฟุตปริ้นรวมในแต่ละช่วงฤดูกาลเพาะปลูกของจังหวัดสุรินทร์ได้ผลตามตารางที่ 1 และแสดงรายละเอียดค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของเกษตรกรแต่ละรายดังภาพที่ 7 พบว่าค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นรวมมีค่าค่อนข้างสูงต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวพื้นที่โครงการโคกกระเทียมของธีระวัฒน์ (2555) และค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวไทยของ Chapagain and Hoekstra (2010a) มีค่าเท่ากับ 2,8971,600 และ1,617 ลบ.ม./ตัน ตามลำดับเนื่องจากค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นนั้นมีมิติเป็นปริมาณน้ำต่อหน่วยผลผลิต จึงทำให้ค่าผลผลิตต่อไร่ (Yield, Y) จึงเป็นตัวแปรสำคัญต่อค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นเช่นเดียวกับค่าการใช้น้ำ (CWU) ในกระบวนการผลิต ดังสมการ (2) และ (3) โดยผลผลิตของข้าวหอมมะลิอินทรีย์เฉลี่ยเท่ากับ 376กก./ไร่ ส่วนข้าวในพื้นที่โครงการโคกกระเทียมและข้าวของประเทศไทยมีผลผลิตเท่ากับ 733 และ416 กก./ไร่ ผลผลิตสุทธิต่อไร่ (Yield, Y) มีค่าแตกต่างกันดังนั้นจึงมีส่วนส่งผลให้การคำนวณวอเตอร์ฟุตปริ้น ตามสมการที่ (2) ได้ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นรวมที่สูง ส่วนกรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นของผลงานวิจัยมีค่าสูงกว่าโดยมีค่า 2280, 462, และ 559 ลบ.ม./ตัน อย่างไรก็ตามจากข้อมูลเกษตรกรที่ได้รับ พบว่าพื้นที่เพาะปลูกข้าวหอมมะลิ จังหวัดสุรินทร์ นั้นอยู่ในพื้นที่นอกเขตชลประทานทั้งสิ้น (ดังภาพที่ 1) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สมมติให้การเพาะปลูกดังกล่าวเป็นการเกษตรน้ำฝนที่ไม่มีการใช้น้ำชลประทาน และส่งผลให้บลูวอเตอร์ฟุตปริ้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีส่วนให้ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นสูง อีกทั้งในช่วงฤดูนาปีที่มีปริมาณฝนตกในพื้นที่มากทำให้เกษตรกรต้องคอยดูแลน้ำในแปลงนาให้ได้ระดับที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ ได้พิจารณาค่าการใช้น้ำ (CWU) ตามแนวคิดของวอเตอร์ฟุตปริ้นจากคู่มือ The Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra et al., 2011) ซึ่งเป็นผลรวมของปริมาณน้ำที่เกิดจากการระเหยในช่วงการเตรียมแปลงและการคายระเหยจริงในช่วงเพาะปลูก ดังแสดงในสมการ (4) ถึง (6) ดังนั้นจึงมีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่ตกลงบนพื้นที่ รวมถึงน้ำท่าผิวดิน (Runoff) และการซึมลึก (Deep percolation) ดังแสดงในสมการ (9) ส่วนค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นนั้นมีค่าต่างกัน โดยค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นข้าวหอมมะลิอินทรีย์มีค่า 621 ลบ.ม./ตัน และโครงการโคกกระเทียมมีค่า 408 ลบ.ม./ตัน เนื่องจากเกษตรกรผู้ปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ ซึ่งใช้ปุ๋ยอินทรีย์มูลสัตว์ เฉลี่ยประมาณ 150-200 กก./ไร่ และใช้ปุ๋ยหมักจากการไถกลบ ซึ่งคำนวณค่าหน่วยน้ำหนักกับพื้นที่ปลูกและค่าร้อยละของไนโตรเจน แต่ในส่วนของการศึกษาพื้นที่โครงการโคกกระเทียมได้มีการใช้ปุ๋ยในอัตราส่วน 25 กิโลกรัม/ไร่ โดยใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 และ 16-20-0 ดังนั้นปริมาณน้ำที่ใช้ในการละลายปริมาณไนเทรต (NO_3) จึงขึ้นอยู่กับผลผลิตต่อไร่ (Y) ที่เป็นตัวส่วนในสมการคำนวณหาค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้น ดังสมการ (3) โดยที่ค่า α , AR และ C_{max} คิดเป็นค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อผลผลิตต่อไร่ (Y) มีค่าต่างกันดังที่กล่าวไว้แล้ว จึงส่งผลให้ได้ค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นทั้ง 2 การศึกษามีค่าต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นของการใช้ปุ๋ยอินทรีย์มีข้อสังเกตที่น่าสนใจในส่วนงานวิจัยของ Torstensson, (2006) ซึ่งเมื่อคำนวณต่อหน่วยน้ำหนักผลผลิตพืชในระบบเกษตรอินทรีย์ปลดปล่อยไนเตรทสู่แหล่งน้ำมากกว่าสองเท่าของเกษตรที่ปลูกในระบบเกษตรที่ใช้ปุ๋ยเคมี สาเหตุที่ทำให้เกิดผลดังกล่าว ก็คือปุ๋ยอินทรีย์ปลดปล่อยไนโตรเจนไม่สอดคล้อง

ความต้องการของพืชในระยะต่างๆ และความสัมพันธ์ของการใช้ปริมาณของปุ๋ยอินทรีย์ที่มากไม่ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นดังในภาพที่ 6

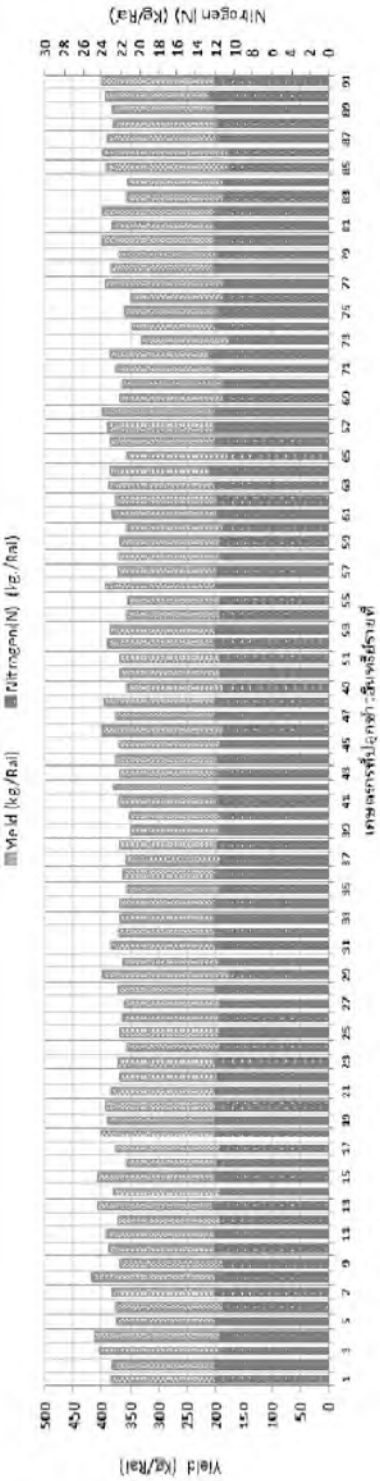
ตารางที่ 1. ตารางเปรียบเทียบผลการศึกษาวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์กับงานวิจัยอื่นๆ

พารามิเตอร์	ข้าวอินทรีย์ (หอมมะลิ105) จ.สุรินทร์(1)	ข้าว กข.15 โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกระเทียม จ.ลพบุรี(2)	ผลการศึกษา (ข้าวเฉลี่ยไทย)(3)	ผลการศึกษา (ข้าวเฉลี่ยทั่วโลก)(4)
Yield (Y) Kg/Rai	376	762	416	718
CWU_{GREEN} (mm)	534.98	220.03	145.34	283.61
WF_{GREEN} (m3/ton)	2277	462	559	632
CWU_{BLUE}	-	348	245	262
WF_{BLUE} (m3/ton)	-	730	942	584
น้ำหนัก(N) Kg/Rai	11.67	15.54	-	-
WF_{Grey} (m3/ton)	621	408	116	109
WF_{Total} (m3/ton)	2,897	1,600	1,617	1,325

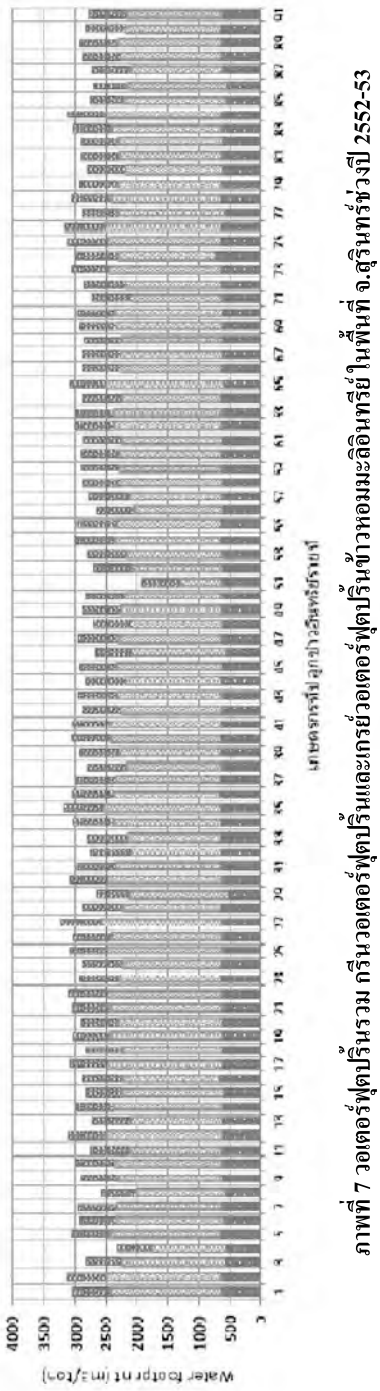
หมายเหตุ : (1) ผลจากงานวิจัย

(2) ธีระวัฒน์ (2555) วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกะเทียม จ.ลพบุรี

(3) (4) Chapagain and Hoekstra(2010a)



ภาพที่ 6 ปริมาณไนโตรเจน (N) และผลผลิตของเกษตรกรตัวอย่างที่ปลูกข้าวหอมมะลิอินทรีย์ ในพื้นที่ จ.สุรินทร์ช่วงปี 2552-53



ภาพที่ 7 วอเตอร์ฟุตปริ้นรวม กรีนวอเตอร์ฟุตปริ้นและเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นข้าวหอมมะลิอินทรีย์ ในพื้นที่ จ.สุรินทร์ช่วงปี 2552-53

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ทำการคำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตปริ้น กรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น และเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ในพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ ในช่วงปีเพาะปลูก 2552/2553 ช่วงฤดูกาลเพาะปลูกนาปี พบว่า ค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์เฉลี่ยนาปีเท่ากับ 2,897 ลบ.ม./ตัน แยกเป็น ค่ากรีนวอเตอร์ฟุตปริ้น 2,277 ลบ.ม./ตัน และค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้น 621 ลบ.ม./ตัน พบว่าข้าวหอมมะลิอินทรีย์มีค่าวอเตอร์ฟุตปริ้นรวมสูงกว่าผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา อันเนื่องมาจากค่าผลผลิตต่อไร่ของข้าวหอมมะลิอินทรีย์มีค่าน้อยกว่าเกือบเท่าตัว รวมกับปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้น้ำที่เข้าสู่ระบบเพาะปลูกมีค่าสูง อย่างไรก็ตาม ค่าบลูวอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวหอมมะลิอินทรีย์ มีค่าเท่ากับ0 เนื่องจากไม่มีน้ำจากการชลประทานเข้าสู่ระบบดังนั้นพื้นที่เพาะปลูกในงานวิจัยนี้ดังนั้นจึงมีต้นทุนด้านน้ำต่ำ เพราะน้ำชลประทานเกิดจากการลงทุนก่อสร้างโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขึ้นสำหรับค่าเกรย์วอเตอร์ฟุตปริ้นมีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณโดย Chapagain and Hoekstra (2010) ประมาณ 50% เนื่องจากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำที่ใช้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าที่ใช้โดย Chapagain and Hoekstra (2010) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่กล่าวถึงการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ในปริมาณที่มากเกินต่อความต้องการของพืชนั้นๆ อาจส่งผลต่อการทำให้คุณภาพน้ำต่ำลง ดังนั้นควรมีการวิเคราะห์อย่างละเอียดในอนาคต เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกรมชลประทาน, กรมอุตุนิยมวิทยาและศูนย์วิจัยข้าว จ.สุรินทร์ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิเคราะห์

บรรณานุกรม

ชินาธิปกรณ์ พงศ์ภิญโญภาพ และธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ , 2554. วอเตอร์ฟุตปริ้นของกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังในประเทศไทย. วิศวกรรมสาร มก.ฉบับที่ 75 ปีที่ 24. หน้า 41 – 51

ทิพย์ปภา สุขุมาลชาติ อดิชัย พรพรหมินทร์ และสุรชัย ลิปิวัฒนาการ, 2554. วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จังหวัดนครสวรรค์, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (WRE0062)

ธีระวัฒน์ ธรรมนิยม.2555. วอเตอร์ฟุตปริ้นของข้าวในพื้นที่ส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกระเทียมวิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

รมณี วังเมือง และปุณมณี สัจจกมล2554 “ร่องรอยการใช้น้ำในอุตสาหกรรมแป้งข้าว,” เอกสารการประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554, ตุลาคม, 2554.

วิบูลย์ บุญยธโรกุล. 2526. หลักการชลประทาน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.274 น.

กลุ่มงานวิจัยความอุดมสมบูรณ์ของดินและปุ๋ยข้าวและธัญพืชเมืองหนาว กองปฐพีวิทยา กรมวิชาการเกษตร, 2534 การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ในนาข้าว

ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและการบริหารน้ำ กรมชลประทาน, 2551.ค่าสัมประสิทธิ์พืช 40 ชนิด (Cropcoefficient : Kc of Penman Monteith). กรุงเทพฯ : กรมชลประทาน.

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization, Rome

Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y.2010a. The Blue, Green and Grey Water Footprint of rice from production and consumption perspectives.Ecological Economics.London.

Chapagain, A.K., and Hoekstra, A.Y. 2010b. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective: Value of water research report series no.40. UNESCO-IHE

Hoekstra, A.Y. and A.K. Chapagain, 2007.Water footprints of nations Water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resour Manage, 21.

Hoekstra, A.Y., A.K.Chapagain,M.M. Aldaya, and M.M. Mekonnen. 2011. The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard.Earthscan,London.

Mekonnen, M.M. and A. Y. Hoekstra, 2010. The green, blue and grey water footprint of crop product, 'Value of Water Research Report Series' of UNESCO-IHE, Report no.47 (Main report Appendices).

Torstensson, G. and co-authors. 2006. Organic farming increases nitrate leaching from soils under cold-temperate conditions Abstract. 18th World Congress of Soil Science, July 9-15, 2006. Philadelphia, USA)

FAO.2009. ETo calculator version 3.2, available at:http://www.fao.org/nr/water/eto.html ,September 2012